

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

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

**MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y PRUEBA DEL AISLADOR ANSI  
DS-15 EN EL SOFTWARE EMTP-RV**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**DIEGO SEBASTIAN PAGUAY GARCÉS**

**DIRECTOR: DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI**

**DMQ, abril 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, DIEGO SEBASTIAN PAGUAY GARCÉS 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.



**DIEGO SEBASTIAN PAGUAY GARCÉS**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DIEGO SEBASTIAN PAGUAY GARCÉS, bajo mi supervisión.



**DR.-ING. 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.

DIEGO SEBASTIAN PAGUAY GARCÉS

DR.-ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ YAULI

## DEDICATORIA

A Dios, por haberme guiado por el camino correcto  
y jamás abandonarme en toda esta aventura.

A mi padre y a mi madre, por todo su apoyo.

A mi hermana, Carla, por ser mi inspiración,  
y para inspirarla.

A mi Benito, por haberme salvado.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios le doy las gracias por haberme brindado todas mis capacidades, por guiarme en mi noche más oscura hacia mis días más brillantes, y por permitirme haber vivido y ahora concluir con toda esta extraña aventura.

A mi padre y a mi madre, por haber sido mi apoyo durante toda mi carrera, y toda mi vida.

A mi hermana por ayudarme, por protegerme, por acompañarme, por ser mi cómplice, por darme suerte, este logro es para ti.

En especial quiero agradecer al Dr.-Ing. Fabián Ernesto Pérez Yauli, por guiarme en todo este proyecto, por su paciencia y su consejo.

A todos mis amigos que ya tenía y que hice durante esta aventura, aprendí muchas cosas nuevas gracias a ustedes, reímos, lloramos, aprendimos y supimos salir adelante. En especial gracias a Plinio y Danny.

A Pamela, porque se ha ganado un lugar muy importante en mi corazón.

Y a mi mascota, Benito, que supo darme esperanza y llenarme de felicidad, y que con su partir me recordó que jamás puedo rendirme. En donde sea que estes, jamás te olvidaré.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.3 ALCANCE .....	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	4
1.4.1 EL AISLADOR ELÉCTRICO .....	4
1.4.2 MATERIALES DIELECTRICOS EN AISLADORES.....	4
1.4.3 TIPOS DE AISLADORES ELÉCTRICOS .....	5
1.4.3.1 CLASIFICACIÓN POR TIPO DE MATERIAL.....	5
1.4.3.2 CLASIFICACIÓN POR TIPO DE MONTAJE .....	6
1.4.4 ASPECTOS FÍSICOS DEL AISLADOR ELÉCTRICO .....	7
1.4.5 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL AISLADOR ELÉCTRICO .....	8
1.4.5 MODELO ESTACIONARIO DE UN AISLADOR ELÉCTRICO.....	10
1.4.6 DISRUPCIÓN EN UN AISLADOR ELÉCTRICO .....	11
1.4.7 PROCESO DE DISRUPCIÓN EN UN AISLADOR CONTAMINADO.....	11
1.4.8 CARACTERÍSTICA VOLTAJE - TIEMPO DE UN AISLADOR.....	12
1.4.9 MODELO DINÁMICO DE UN AISLADOR ELÉCTRICO.....	13
1.4.10 PRUEBAS ELÉCTRICAS PARA AISLADORES .....	14
1.4.11 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	14
1.4.11.1 INTERVALO ESTADÍSTICO DE CONFIANZA .....	14
1.4.11.2 PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	15
2 METODOLOGÍA.....	16
2.1 INTERPRETACIÓN DE LAS NORMAS TÉCNICAS .....	16
2.1.1 NORMA ANSI/NEMA C29.13-2018.....	16
2.1.2 NORMA ANSI/NEMA C29.11-2020.....	17
2.1.2.1 PRUEBA DE DISRUPCIÓN EN SECO A BAJA FRECUENCIA.....	17
2.1.2.2 PRUEBA DE DISRUPCIÓN EN HUMEDO A BAJA FRECUENCIA.....	20
2.1.3 DIAGRAMA DE INTERPRETACIÓN DE LAS NORMAS TÉCNICAS.....	21

2.2	MODELADO EN EL SOFTWARE EMTP-RV .....	22
2.2.1	MODELACIÓN DEL AISLADOR .....	23
2.2.1.1	OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA VOLTAJE – TIEMPO .....	24
2.2.1.2	IMPLEMENTACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA VOLTAJE – TIEMPO EN EMTP-RV .....	25
2.2.1.3	DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL AISLADOR .....	26
2.2.2	MODELACIÓN DE LA FUENTE DE PRUEBA .....	27
2.2.2.1	DIAGRAMA DE MODELACIÓN DE LA FUENTE DE PRUEBA .....	28
2.2.3	MODELACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LABORATORIO .....	29
2.2.3.1	PROTECCIÓN DE EQUIPOS DE LABORATORIO .....	29
2.2.3.2	CONDICIONES AMBIENTALES .....	30
2.2.3.3	DIAGRAMA DE MODELACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LABORATORIO .....	31
2.3	SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE EMTP-RV .....	32
2.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	33
2.4.1	DETERMINACIÓN DE INTERVALO DE INCERTIDUMBRE .....	33
2.4.2	APLICACIÓN DE PRUEBA DE HIPOTESIS .....	34
2.4.3	DIAGRAMA DE ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	34
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	35
3.1	RESULTADOS .....	35
3.1.1	SISTEMA DE ESTUDIO .....	35
3.1.1.1	MODELO DEL AISLADOR ANSI DS-15 .....	36
3.1.1.2	MODELO DE LA FUENTE DE VOLTAJE .....	39
3.1.1.3	MODELO DE LAS CONDICIONES DE LABOTARIO .....	40
3.1.2	SIMULACIÓN DE PRUEBAS DE AISLADORES .....	41
3.1.2.1	CASO 1: AISLADOR ANSI DS-15 IDEAL .....	41
3.1.2.2	CASO 3: AISLADOR ANSI DS-15 SOBREDIMENSIONADO .....	46
3.1.2.2	CASO 6: AISLADOR ANSI DS-15 SUBDIMENSIONADO .....	50
3.1.3	VERIFICACIÓN DE RESULTADOS .....	55
3.1.3.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLEMENTARIO .....	56
3.2	CONCLUSIONES .....	58
3.3	RECOMENDACIONES .....	59
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
5	ANEXOS .....	61

## RESUMEN

En el presente Trabajo de Integración Curricular se desarrolla un sistema de estudio en el software EMTP-RV en el cual se ha modelado al aislador ANSI DS-15, junto con los elementos necesarios para la simulación de la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia y la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia. Las normas técnicas que se han tomado como base para este estudio son la norma ANSI/NEMA C29.13-2018 y la norma ANSI/NEMA C29.11-2020. En el sistema de estudio implementado se consideran las condiciones de prueba descritas por las normas técnicas, como son la fuente de aplicación de voltaje y las condiciones ambientales, junto con las características eléctricas del aislador elegido.

Se ha realizado una revisión bibliográfica de los elementos necesarios para modelar al aislador elegido, como es la característica voltaje - tiempo. Seguido a ello, el contenido de las normas técnicas se ha interpretado para plantear los componentes del sistema de estudio para la simulación y prueba del aislador.

Finalmente, se ha simulado las pruebas elegidas en el software EMTP-RV en todos los casos de estudio que fueron planteados. La verificación del modelo implementado se realiza con el análisis de los resultados obtenidos de la simulación, y complementariamente con el uso de herramientas estadísticas.

**PALABRAS CLAVE:** aislador, norma técnica, EMTP-RV, pruebas eléctricas de aisladores, modelo de aislador.

## ABSTRACT

In the present curriculum integration work, a study system is developed in the EMTP-RV software, in which there has been modelled an ANSI DS-15 insulator with other necessary elements for the simulation of the low frequency dry flashover test and low frequency wet flashover test. The technical standards used as baseline for this study are the ANSI/NEMA C29.13-2018 and ANSI/NEMA C29.11-2020. The system implemented considers the procedures described in both technical standards, such as the voltage application and the ambient corrections, as well as the electrical characteristics of the chosen insulator.

The necessary elements for the modelling of the chosen insulator, such as the volt time curve, come from a bibliographic review. Later, the procedures and contents of the technical standards have been interpreted, so that the components of the study system could be proposed for the simulation and testing of the insulator.

Finally, the chosen tests were simulated for all the proposed study cases with the aid of the EMTP-RV software. Model verification was conducted by the analysis of simulation results, and the use of statistics tools as a complement.

**KEYWORDS:** electrical insulator, technical standard, electrical testing of insulators, insulator modelling.

# 1 INTRODUCCIÓN

El aislamiento es un componente fundamental en la operación en un sistema eléctrico de potencia, este mantiene separados diferentes niveles de voltaje, protege a las instalaciones del sistema, y a los usuarios de este, frente a solicitaciones por sobrevoltajes que puedan presentarse. Lo cual hace evidente que el aislamiento debe ser probado de modo que cumpla con las características adecuadas para la aplicación que se le vaya a asignar.

En líneas de transmisión, subtransmisión y distribución se utilizan diferentes tipos de aisladores para soportar a los conductores energizados, y su elección toma en cuenta los requisitos de la línea a lo largo de su recorrido. Para facilitar el diseño y selección de los aisladores de una línea, existen normas técnicas que describen a detalle todos los requisitos que un aislador debe cumplir para ser clasificados para un uso específico.

Las normas técnicas presentan las características y los procedimientos para la aplicación de las pruebas, de modo que se determine si se cumple con los requisitos de diseño. Estas pruebas se realizan en laboratorios especializados, y en el caso de las pruebas eléctricas, estas se realizan en un laboratorio de alto voltaje equipado para prueba de aisladores.

Debido a la necesidad de un espacio físico en donde se pueda realizar estas pruebas, y de todos los equipos necesarios que permitan su aplicación, y al considerar el avance tecnológico en software computacional de simulación, se ha visto la oportunidad de modelar el aislador, así como la aplicación de las pruebas de aisladores en un software de simulación, que en este caso es el EMTP-RV (Electromagnetic Transients Program).

La implementación de un sistema de estudio para la simulación de pruebas de aisladores se considera una herramienta útil tanto para entender el comportamiento de un aislador ante distintas pruebas, como para documentar y hacer reproducible, sin necesidad de un laboratorio físico, las pruebas que se han realizado a uno o varios aisladores.

En Ecuador, el sistema de distribución en medio voltaje conforma una gran parte del sistema eléctrico de potencia, y como consecuencia de ello, se ha elegido un aislador de medio voltaje para su modelación, simulación y prueba en el software EMTP-RV.

Este trabajo de integración curricular se estructura de modo que, en el primer capítulo se presenta los objetivos y el alcance de la investigación, junto a la fundamentación teórica sobre aisladores eléctricos, en el segundo capítulo se plantea la metodología para: la interpretación de las normas técnicas para prueba de aisladores, la modelación y simulación en el software EMTP-RV, y, el análisis de resultados de la simulación de las pruebas de aisladores, en el tercer capítulo se presenta el sistema de estudio completo,

junto con la simulación de las pruebas a cada uno de los casos de estudio planteados, se tabulan los resultados y se aplica un análisis estadístico complementario, y se finaliza con las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de integración curricular. El **ANEXO I** es la guía para el uso y simulación del sistema de estudio implementado en EMTP-RV.

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar la modelación, simulación y prueba al aislador polimérico de suspensión para nivel de voltaje de 15 kV, clase DS-15, de la norma ANSI/NEMA C29.13-2018 en el software EMTP-RV.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Obtener el modelo de un aislador polimérico de suspensión para nivel de voltaje de 15 kV ANSI DS-15 en el software EMTP-RV.
2. Implementar las condiciones de prueba necesarias para el aislador seleccionado teniendo en cuenta los procedimientos de la norma ANSI/NEMA C29.11-2020 en el software EMTP-RV.
3. Simular las pruebas de flameo en seco a baja frecuencia y flameo en húmedo a baja frecuencia del aislador seleccionado en el software EMTP-RV.
4. Analizar los resultados de simulación para determinar si el modelo implementado del aislador ANSI DS-15 cumple con las características técnicas establecidas en la norma ANSI/NEMA C29.13-2018.

## **1.3 ALCANCE**

El presente Trabajo de Integración Curricular plantea implementar un modelo del aislador polimérico de suspensión para 15 kV ANSI DS-15 en el software EMTP-RV, el cual será sometido mediante simulación a las pruebas de diseño eléctricas establecidas por la norma ANSI/NEMA C29.13-2018, específicamente a las pruebas de flameo en seco a baja frecuencia y flameo en húmedo a baja frecuencia, teniendo en cuenta los procedimientos de prueba definidos por la norma ANSI/NEMA C29.11-2020. También se tomarán como referencia los procedimientos de la norma NTC 3275.

En primera instancia se realizará una revisión bibliográfica sobre el comportamiento, características técnicas y modelos ya existentes de un aislador. Además, se revisará sobre el funcionamiento del software EMTP-RV. Seguido de ello, se deberá implementar el modelo del aislador ANSI DS-15 y el sistema eléctrico de prueba que represente a las condiciones de laboratorio bajo las que deben realizarse las pruebas seleccionadas, dichas condiciones serán interpretadas de la norma ANSI/NEMA C29.11-2020 donde se describe el proceso bajo el cual se debe realizar la prueba de aisladores poliméricos. El modelo de aislador a implementarse deberá tener en cuenta una curva característica de voltaje de disrupción en función del tiempo, así mismo el voltaje a aplicarse al modelo de aislador debe tener en cuenta una fuente de voltaje variable en el tiempo. Estos parámetros base para la simulación se han obtenido de la literatura técnica revisada y han permitido definir las pruebas que se van a simular. Una vez obtenidos los resultados de la simulación de las pruebas de flameo en seco y en húmedo a baja frecuencia, se verificará dichos resultados con lo establecido en la norma ANSI/NEMA C29.13-2018 [1], [2].

A continuación, se detalla las fases a realizarse:

A. Fase Teórica

Esta fase servirá para establecer el fundamento base para el desarrollo del Trabajo de Integración Curricular, se realizará una revisión bibliográfica del modelado del aislador seleccionado, así como del funcionamiento del software EMTP-RV.

B. Fase de obtención de información

En esta fase se obtendrá la información necesaria para definir el modelo del aislador asignado, y definir también el sistema eléctrico que permitirá simular las pruebas que se realizarán al aislador.

C. Fase de desarrollo metodológico

Con la información obtenida para el desarrollo del modelo de aislador sobre el cual se simularán las pruebas seleccionadas en el software EMTP-RV, se establecerá un procedimiento que permita y tenga como fin analizar el modelo de aislador que se ha implementado de modo que tenga en cuenta el procedimiento descrito en la norma técnica.

D. Fase de simulación

Se realizará la simulación en el software EMTP-RV de los casos de estudio establecidos en las fases anteriores, y se obtendrán los resultados que permitirán validar el modelo de aislador y del sistema eléctrico de prueba implementado.

## E. Fase de análisis de resultados

Con los resultados de simulación obtenidos del software EMTP-RV se verificará que el modelo de aislador que se implementó cumple con lo establecido en las normas técnicas que definen las características técnicas del aislador ANSI DS-15.

## 1.4 MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los fundamentos teóricos que se utilizaron para la elaboración de este trabajo de integración curricular, tales como las características eléctricas necesarias para fundamentar los modelos de aislador que han sido implementados.

### 1.4.1 EL AISLADOR ELÉCTRICO

La concepción de la transmisión de energía eléctrica a gran escala ha traído consigo el desarrollo de un equipo que permita separar efectivamente los conductores sometidos a un nivel de voltaje de los elementos que deben estar conectados a tierra [3].

Los conductores eléctricos utilizados en líneas de transmisión, subtransmisión y distribución son soportados por aisladores eléctricos, dispuestos en forma individual o de cadena de aisladores, y estos deben presentar características tanto mecánicas como eléctricas con la finalidad de soportar las diferentes condiciones operativas y ambientales a las que se encontrarán expuestos. En general, un aislador debe presentar buenas características mecánicas y debe tener una resistencia dieléctrica suficiente para soportar el nivel del voltaje para el que fue diseñado [3], [4].

### 1.4.2 MATERIALES DIELECTRICOS EN AISLADORES

El propósito de los materiales dieléctricos en el aislamiento de un circuito eléctrico consiste en confinar y guiar a la corriente eléctrica dentro del circuito, debido a ello, los materiales usados como aislamiento deben presentar algunas características:

- Alta resistencia al flujo de corriente eléctrica.
- Alta rigidez frente a estrés por sollicitaciones eléctricas.
- Buenas propiedades de disipación de calor.

Al considerar el caso de los aisladores eléctricos, la característica más importante es la rigidez dieléctrica, la cual consiste en el valor del voltaje instantáneo, o gradiente de potencial, en la cual se produce la ruptura del material y empieza el flujo de corriente

eléctrica, esta característica es una función de la geometría del aislador y las propiedades eléctricas del material. Estos materiales deben poseer resistencia a la tensión y comprensión mecánica para soportar las fuerzas ejercidas sobre ellos [3], [5].

Las condiciones ambientales son un factor que influye sobre el desempeño de un aislador. Condiciones como temperatura, contaminación, químicos, humedad, radiación ultravioleta y el clima local. La exposición a estas condiciones afecta a la vida útil del material [3], [5].

Las condiciones operativas a las que se somete un aislador también afectan su vida útil, y algunas son: degradación térmica, solicitaciones del sistema eléctrico como cortocircuitos y disrupciones a las que el aislador ha sido sometido, la carga eléctrica de la línea que soporta el aislador, vibraciones mecánicas y el mantenimiento del aislador [3], [5].

### **1.4.3 TIPOS DE AISLADORES ELÉCTRICOS**

Para seleccionar un aislador eléctrico se considera principalmente el nivel de voltaje en el que será instalado y las condiciones operativas y ambientales a las que estará sujeto. Los aisladores se clasifican principalmente por el material dieléctrico del que han sido contruidos y por su sistema de montaje [6].

#### **1.4.3.1 CLASIFICACIÓN POR TIPO DE MATERIAL**

Al clasificar por el material del aislador se tienen 2 grupos, los cerámicos y los poliméricos.

- **Aisladores Cerámicos**

Los aisladores cerámicos comprenden a los aisladores contruidos de porcelana y vidrio templado. El montaje de estos aisladores se consigue con un pin de hierro recubierto con zinc y un zócalo de tipo pin y bola o de tipo Clevis, unidos por cemento al material dieléctrico. Este tipo de aislador ha tenido uso desde finales del siglo 1800 y, en la actualidad, comprende la mayor parte de aisladores que se encuentran en operación [7].

La porcelana y el vidrio son materiales densos, lo cual resulta en un peso alto. Son materiales frágiles, y deben ser manejados con cuidado para evitar rupturas y grietas. Su alta resistencia a la temperatura y su baja degradación con el tiempo son ventajas de este tipo de material. La principal desventaja es que son altamente susceptibles al agua, y por ello los aisladores cerámicos son recubiertos con un barniz dieléctrico especial, y poseen una distancia de fuga grande y complicadas formas en su contorno para asegurar la suficiente resiliencia en condiciones de humedad y contaminación [6], [7].

- **Aisladores Poliméricos**

Los aisladores poliméricos utilizan materiales como caucho de silicio o sintético, su núcleo comprende una barra de resina reforzada con fibra de vidrio, su montaje utiliza extremos metálicos unidos al núcleo. Este tipo de aislador ha desplazado al aislador cerámico en aplicaciones de medio voltaje. Su uso se registra desde los años 1960 y 1970 [7].

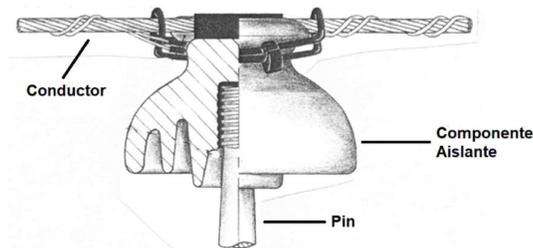
Los aisladores poliméricos son livianos y elásticos, lo cual facilita su manejo e instalación. Estos presentan alta impermeabilidad debido a su alta energía superficial. Una ventaja frente a los aisladores cerámicos es la menor incidencia de falla debido a vandalismo por disparos, ya que estos no se destruyen y fallan al momento de recibir un disparo. Este tipo de aislador permite incluir en su diseño una mayor distancia de fuga, lo cual los hace más ajustables para diferentes condiciones ambientales. La principal desventaja de este tipo de aislador es que son altamente susceptibles al envejecimiento del material dieléctrico, lo cual resulta en la pérdida de sus propiedades originales con el paso del tiempo [6], [7].

### 1.4.3.2 CLASIFICACIÓN POR TIPO DE MONTAJE

El catálogo digital de redes de distribución de energía eléctrica del ministerio de energía y recursos naturales no renovables del Ecuador (MERNNR), clasifica por su montaje a los aisladores usados en redes de distribución de medio voltaje [8].

- **Aislador Tipo Pin**

Este tipo de aislador comprende un componente aislante el cual se monta sobre un pin el cual se fija a una estructura de soporte. El conductor descansa sobre la parte superior del componente aislante y es sujetado por hilos conductores a la parte superior del componente aislante. Este tipo de aislador puede ser polimérico o cerámico, y es usado en redes de has 50 kV [3]. En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de este tipo de aislador.



**Figura 1.1** Aislador Tipo Pin [3].

Este tipo de aislador se utiliza principalmente en estructuras de tipo pasante, debido a que este permite sostener el conductor cuando se tiene un ángulo de entrada y salida de conductor cercano a cero grados [8].

- **Aislador de Suspensión**

Este tipo de aislador comprende un componente aislante el cual se monta de manera transversal con un montaje de zócalo cuando el aislador es de material cerámico, y de extremos metálicos cuando el aislador es de material polimérico. En este tipo de aislador el conductor se sostiene fijamente de un extremo del aislador, mientras que el otro extremo es sujetado a la estructura de soporte [3]. En la Figura 1.2 se muestra este tipo de aislador.



**Figura 1.2** Aislador de Suspensión: cerámico (a), polimérico (b). [8]

Este tipo de aislador es utilizado principalmente en estructuras de retención y terminales, debido a que permite tener mayores ángulos de entrada y salida de conductor respecto a los aisladores tipo pin [8].

#### **1.4.4 ASPECTOS FÍSICOS DEL AISLADOR ELÉCTRICO**

La geometría de un aislador juega un papel importante en cuanto a sus capacidades eléctricas y mecánicas, y 3 dimensiones son las más importantes para su caracterización.

- **Distancia de Arco**

La distancia de arco se define como la mínima distancia en aire externa al aislador, entre dos puntos que se encuentran a diferente nivel de voltaje, ver Figura 1.3. Esta distancia es una aproximación del camino que sigue el arco eléctrico cuando se produce la disrupción en aire del aislador y su superficie se encuentre limpia. Esta distancia se relaciona con los voltajes de disrupción a baja frecuencia y de impulso, y suele ser la que determina el tamaño físico del aislador a usarse para un nivel de voltaje dado [3], [9].



**Figura 1.3** Distancia de Arco en un Aislador de Suspensión [3].

- **Distancia de Fuga**

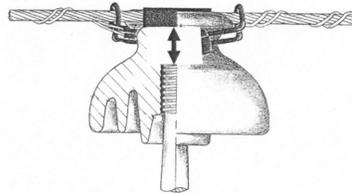
La distancia de fuga se define como la mínima distancia alrededor del contorno externo del aislador, entre dos puntos que se encuentran a diferente nivel de voltaje, ver Figura 1.4. Esta distancia es una aproximación del camino que sigue el arco eléctrico al momento que se produzca la disrupción en aire del aislador cuando su superficie se encuentre contaminada y se relaciona con el voltaje de disrupción a baja frecuencia cuando el aislador se encuentra contaminado [3], [9].



**Figura 1.4** Distancia de Fuga en un Aislador de Suspensión [3].

- **Distancia de Perforación**

La distancia de perforación se define como la mínima distancia a través del material dieléctrico del aislador entre dos puntos que se encuentran a diferente nivel de voltaje, ver Figura 1.5. Esta distancia depende principalmente de la calidad del material y del proceso de fabricación del aislador. Tras la perforación del dieléctrico el aislador sufre daño permanente, y ya no se encuentra apto para operar con normalidad, esta distancia debe ser la suficiente para soportar las sollicitaciones de voltaje que pueden presentarse, principalmente los sobrevoltajes por impulsos tipo rayo [3], [9].



**Figura 1.5** Distancia de Perforación en un Aislador Tipo Pin [3].

### **1.4.5 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DEL AISLADOR ELÉCTRICO**

El material dieléctrico y la geometría del aislador juegan un papel importante al momento de determinar las características eléctricas de un aislador. A continuación, se describen las más importantes para este estudio.

- **Rigidez Dieléctrica**

La rigidez dieléctrica de un material se considera como el máximo estrés de voltaje que un material dieléctrico puede soportar sin que exista la disrupción completa del mismo.

Al considerar un sistema eléctrico alimentado por corriente alterna a frecuencia nominal, en estado estacionario, el máximo estrés de voltaje que puede aparecer es el voltaje pico de la onda de voltaje a frecuencia industrial. Esto es importante cuando se analizan otros tipos de sobrevoltaje con respecto a la rigidez dieléctrica del material, debido a que sobrevoltajes como de maniobra o de impulso solamente se definen por su valor pico [10].

- **Perdida dieléctrica**

Un material dieléctrico tiene la propiedad de admitir líneas de campo eléctrico y magnético a través de él, mas no permite el paso de corriente eléctrica entre sus terminales. Las imperfecciones en estos materiales provocan la conducción de pequeñas cargas, y estas dependen de las características del material y de la amplitud del voltaje aplicado [5].

La pérdida dieléctrica de un aislador se debe a las imperfecciones intrínsecas del material dieléctrico con el que el aislador ha sido construido. En los materiales dieléctricos se contempla que estas pérdidas sean mínimas.

Los aisladores usan el aire como material dieléctrico en condiciones normales de operación, en donde está perdida es menor. Cuando existe alto estrés dieléctrico sobre el aire, o este se ha ionizado, la perdida dieléctrica se incrementa. La temperatura ambiente, humedad del aire y el efecto corona afectan a esta perdida y son de carácter acumulativo.

La pérdida dieléctrica se mide en vatios, ya que es de naturaleza resistiva, y representa una medida de la energía disipada a través y alrededor de la superficie del aislador [5].

- **Factor de Potencia Dieléctrico**

El factor de potencia dieléctrico de un aislador está definido como la razón entre la potencia activa disipada por el aire y la potencia aparente efectiva sobre el aislador cuando se prueba el aislador con su voltaje nominal en corriente alterna. Matemáticamente se expresa como el coseno de la diferencia angular entre la corriente total sobre el aislador y el voltaje aplicado a los terminales del aislador,  $\cos \theta$ , dicha diferencia angular recibe el nombre de ángulo de perdida  $\theta$ . Este factor representa una medida de la energía disipada por el aislador bajo sus condiciones nominales de operación [5].

- **Tangente de Perdida**

La tangente de pérdida de un aislador se define como la razón entre la potencia activa disipada por el aire y la corriente total sobre el aislador. Matemáticamente se expresa como la tangente del ángulo complementario al ángulo de perdidas,  $\tan (90 - \theta)$  o  $\tan \delta$  [5].

- **Capacitancia del Aislador**

La capacitancia es una característica intrínseca de los materiales dieléctricos. La concepción básica de un capacitor plantea un material dieléctrico entre dos placas paralelas conductoras que se extienden infinitamente, que está sometido a un campo eléctrico uniforme. Al extender esta idea, un aislador eléctrico también cumple la definición de un capacitor, puesto a que es un material dieléctrico conectado a dos electrodos, uno puesto a tierra y el otro al nivel de voltaje del sistema donde se ha instalado, lo cual da lugar a un campo eléctrico sobre el material dieléctrico y los electrodos [10].

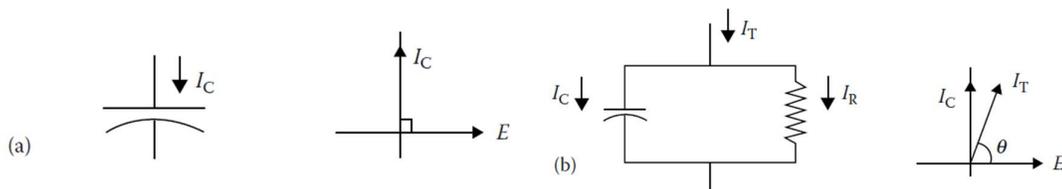
Calcular analíticamente la capacitancia en Faradios de un aislador es una tarea complicada debido a las formas poco convencionales de los diferentes tipos de aisladores. Tanto la configuración geométrica de los electrodos, el volumen y las características del material dieléctrico no se prestan para realizar un cálculo analítico exacto.

El valor numérico de la capacitancia de un aislador se obtiene en un laboratorio con el uso de un equipo específico para determinar la capacitancia del aislador, o con la aplicación de modelos matemáticos numéricos los cuales consideran la geometría externa del aislador y el campo eléctrico aplicado, los dos métodos numéricos utilizados para esta tarea son:

- Método de Elementos Finitos.
- Método de Simulación de Carga [10].

### 1.4.5 MODELO ESTACIONARIO DE UN AISLADOR ELÉCTRICO

Un aislador ideal puede ser representado como un capacitor, cuando este opera en condiciones normales y se le aplica su voltaje nominal. Sin embargo, debido a las imperfecciones en la construcción del aislador, el material dieléctrico utilizado y la contaminación, todos los aisladores presentan pérdidas en su condición normal de operación, las cuales se representan como una resistencia en paralelo.



**Figura 1.6** Circuito equivalente de un aislador: ideal (a), real (b) [5].

Al tener en cuenta el circuito (b) de la Figura 1.6, se puede establecer que, bajo condiciones normales de operación, la resistencia de un aislador deberá poseer un valor alto dependiente de la distancia de arco y de la contaminación superficial del aislador, y su

capacitancia un valor bajo el cual depende del tipo de aislador y del material dieléctrico. Esto es una consecuencia directa de que el aislador debe oponerse al flujo de corriente a frecuencia nominal, y dirigir dicha corriente hacia el interior de los conductores puestos a voltaje, y mantener en potencial cero a los elementos puestos a tierra [5].

#### **1.4.6 DISRUPCIÓN EN UN AISLADOR ELÉCTRICO**

La disrupción de un aislador eléctrico puede atribuirse a dos causas:

- **Falla debido a incremento excesivo de la pérdida dieléctrica.**

La falla debido al incremento excesivo de la pérdida dieléctrica se relaciona con el deterioro, daño o excesiva contaminación en un aislador, este tipo de falla contempla un proceso gradual desde el incremento de la pérdida dieléctrica hasta la disrupción completa del aislador, esta causa de disrupción es una función del tiempo de operación del aislador [5].

- **Falla debido a estrés en el aislador debido a una sollicitación de sobrevoltaje.**

La falla debido a estrés en el aislador debido a un sobrevoltaje se da cuando se aplica al aislador un voltaje que supera su rigidez dieléctrica [5]. En este tipo de falla, el voltaje aplicado no necesariamente será de carácter. Pueden presentarse formas de onda de voltaje de impulso o de maniobra, o voltajes alternos que incrementan rápidamente su pendiente hasta la disrupción del aislador [10].

#### **1.4.7 PROCESO DE DISRUPCIÓN EN UN AISLADOR CONTAMINADO**

El mecanismo de disrupción cuando existe contaminación en la superficie de un aislador está determinado principalmente por las características de su material dieléctrico. Los aisladores cerámicos tienen una característica hidrofílica, por lo cual su superficie se humedece completamente y esto conlleva a la formación de una capa de electrolito sobre la superficie del aislador. En contraste, los aisladores poliméricos son de característica hidrofóbica, de modo que no se forma una capa continua conductiva sobre la superficie del aislador, en su lugar se forman depósitos separados de dieléctrico sobre su superficie [3].

La formación de una capa de contaminación sobre la superficie de un aislador es un evento inevitable, por lo cual se debe considerar en su diseño dicha condición de operación.

La contaminación no influye sobre los niveles de disrupción para sobrevoltajes tipo impulso o de maniobra, y debido a ello la contaminación no se toma en cuenta en dichos casos.

Al encontrarse seca la superficie del aislador, la capa de contaminación no presenta condiciones aptas para la conducción eléctrica. En presencia de humedad debido a

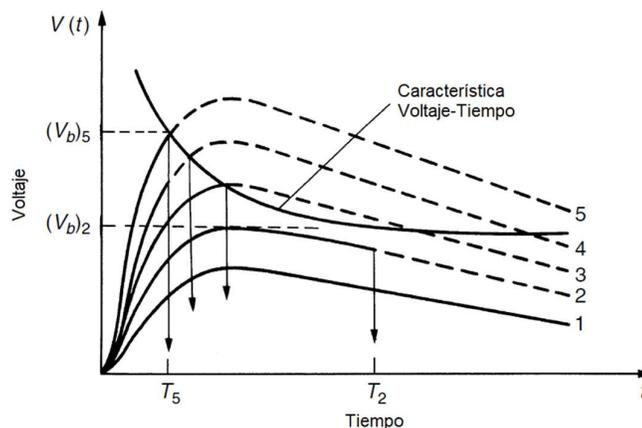
condiciones ambientales como lluvia, niebla o rocío, la capa de contaminación se vuelve conductiva [3], [7]. En condiciones húmedas se presenta la siguiente secuencia de eventos:

- Formación de la capa conductiva
- Formación de la banda seca
- Disrupción parcial
- Crecimiento del arco eléctrico
- Disrupción global [7]

En el **ANEXO II** se describe el nivel de contaminación de un aislador.

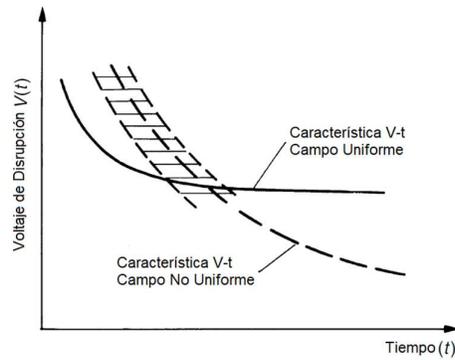
#### 1.4.8 CARACTERÍSTICA VOLTAJE - TIEMPO DE UN AISLADOR

La característica del voltaje de disrupción en función del tiempo de un aislador eléctrico es una función de factores como la distancia entre electrodos, la geometría del aislador, la pendiente de incremento del voltaje aplicado, el tiempo de aplicación del voltaje, y la forma de onda del voltaje aplicado. Esta característica se obtiene de manera experimental al aplicar impulsos con diferentes valores de voltaje pico y registrar el tiempo en el que se presenta la disrupción en el aislador, esta suele presentarse con un retraso respecto al tiempo del voltaje pico. La característica voltaje tiempo de un aislador, o cadena de aisladores, puede ser representada por una ecuación empírica [7], [10]. Un ejemplo de una característica voltaje tiempo convencional se muestra en la Figura 1.7.



**Figura 1.7** Curva Voltaje-Tiempo formada a partir de sobrevoltajes tipo impulso [7].

Debido a la no uniformidad del campo eléctrico sobre un aislador, la característica voltaje tiempo de un aislador tiende a comprender una banda de valores distribuidos estadísticamente en forma normal [7], [11].



**Figura 1.8** Curva Voltaje-Tiempo para un campo eléctrico uniforme y no uniforme [7].

En la Figura 1.8 se observa que, para campos eléctricos uniformes, la característica voltaje tiempo tendrá un comportamiento determinista, mientras que, para campos eléctricos no uniformes, el comportamiento de la curva voltaje tiempo será estadístico [7], [11].

#### 1.4.9 MODELO DINÁMICO DE UN AISLADOR ELÉCTRICO

El modelo dinámico de un aislador tiene el objetivo de replicar el comportamiento de un aislador cuando se presenta una sollicitación de sobrevoltaje de carácter transitorio, y tiene un enfoque específico en el proceso de disrupción en el aislador. Se considera un carácter experimental, correspondiente a las curvas voltaje tiempo, o un carácter analítico, correspondiente a métodos de integración por igualdad de áreas o el método de propagación de líder. Estos métodos permiten modelar al aislador en diferentes condiciones, y cada uno presenta sus respectivas ventajas y desventajas. [12]

Para reproducir la disrupción de un aislador, se utiliza un interruptor controlado y su comportamiento se asocia a uno de los modelos mencionados anteriormente, y conectada en serie una resistencia que representa al canal del arco eléctrico. [12]

Si se utiliza un modelo de curvas voltaje tiempo, la disrupción tiene lugar cuando la diferencia de potencial en los terminales del aislador alcanza o supera la rigidez dieléctrica para un tiempo determinado. En la Ecuación (1.1) se presenta un ejemplo de una característica voltaje tiempo usada para aisladores de un sistema de distribución.[11], [12]

$$U_b = A \times (t_b)^B \quad (1.1)$$

En donde:

$U_b$  = voltaje de disrupción

$t_b$  = tiempo al que se produce la disrupción

Las constantes  $A$  y  $B$  de la Ecuación (1.1) dependen de las características constructivas del aislador y de la naturaleza de las solicitaciones de sobrevoltaje con los que se ha obtenido la curva voltaje tiempo [11], [12].

#### **1.4.10 PRUEBAS ELÉCTRICAS PARA AISLADORES**

Los aisladores son probados con procedimientos normalizados que han sido publicados por entidades nacionales o internacionales, como la IEC, IEEE o ANSI, entre otras. Todos los aisladores deben ser sometidos a pruebas mecánicas y eléctricas, con el fin de comprobar que están aptos para su entrada a servicio en su prestación correspondiente. En las normas técnicas están definidas las pruebas para cada diferente tipo de aislador, y se considera el material y el montaje de este [7].

Las pruebas mecánicas tienen como fin determinar si los materiales y la construcción del aislador son adecuados. Las principales pruebas mecánicas comprenden: de tensión, de ciclo térmico mecánico, de torsión y de apalancamiento [7], [9].

Las pruebas eléctricas tienen como fin determinar si la geometría y material dieléctrico usado en el aislador presentara la rigidez dieléctrica suficiente frente a diferentes solicitaciones de sobrevoltaje. Las principales pruebas eléctricas comprenden: disrupción en seco y húmedo a baja frecuencia, disrupción por impulso critico positivo y negativo, y prueba de voltaje de radio influencia [7], [9].

#### **1.4.11 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

En este trabajo de integración curricular se utilizan dos herramientas de análisis estadístico para la verificación complementaria de datos, las cuales se describen a continuación.

##### **1.4.11.1 INTERVALO ESTADÍSTICO DE CONFIANZA**

El intervalo estadístico de confianza consiste en un rango de valores obtenido a partir de una medición puntal de una variable, junto con un porcentaje que indica la seguridad que se tiene en que el valor real de la variable se encuentre dentro del rango especificado. Este porcentaje recibe el nombre de nivel de confianza  $\alpha$ .

Al considerar una población en la que se conoce el promedio de la muestra  $\bar{X}$ , que sigue una distribución normal, y la desviación estándar  $\sigma$ , el intervalo de confianza de la media de la población  $\mu$  se define como se muestra en la Ecuación (1.2) [13].

$$\bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.2)$$

El ancho del intervalo es proporcional a la precisión, y el nivel de confianza es inversamente proporcional al ancho del intervalo. Esto se debe tener en cuenta al momento de elegir el nivel de confianza para el intervalo de confianza.

#### **1.4.11.2 PRUEBA DE HIPÓTESIS**

La prueba de hipótesis consiste en un método estadístico bajo el cual una hipótesis es puesta a prueba al comparar valores medidos con valores predichos por la hipótesis. Los valores lejanos a los predichos son evidencia en contra de la hipótesis. Este tipo de prueba comprende 5 elementos: suposiciones, hipótesis, estadístico de prueba, valor de probabilidad y conclusión [13].

Las suposiciones se realizan para asegurar la validez de la prueba y se considera el tipo de datos y de la distribución estadística, el método de muestreo y el tamaño de muestra.

En una prueba de hipótesis se debe plantear una hipótesis nula y una hipótesis alternativa. La hipótesis nula es el valor inicial que se cree verdadero para la variable. La hipótesis alternativa se opone a la hipótesis nula, y determina que la variable tiene un valor diferente al especificado por la hipótesis nula [13].

El estadístico de prueba  $Z$  es un valor calculado a partir de los datos de la muestra para probar la hipótesis nula. La Ecuación (1.2) y Ecuación (1.3) utilizan las mismas variables.

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (1.3)$$

El valor de probabilidad es la probabilidad con la que, de ser la hipótesis nula verdadera, el estadístico de prueba se encuentre dentro de los valores predichos.

Este tipo de prueba estadística tiene como objetivo analizar si los datos de la muestra contradicen a la hipótesis nula, y en dicho caso se toma como verdadera a la hipótesis alternativa. La aceptación de una hipótesis implica el rechazo de la otra, por lo cual, las hipótesis deben ser planteadas antes de coleccionar o analizar los datos de la muestra [13].

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 INTERPRETACIÓN DE LAS NORMAS TÉCNICAS

Al considerar que los objetivos de este trabajo de integración curricular consisten en obtener un modelo de aislador eléctrico sobre el cual se pueda realizar las pruebas eléctricas correspondientes y replicar en lo posible las condiciones de un laboratorio de prueba de aisladores, todo esto dentro del entorno de simulación del software EMTP-RV, es necesario interpretar las normas técnicas relacionadas con el tipo de aislador que ha sido seleccionado para este estudio.

#### 2.1.1 NORMA ANSI/NEMA C29.13-2018

La norma técnica ANSI/NEMA C29.13-2018 está enfocada en aisladores de suspensión contruidos de material polimérico. En esta norma técnica se definen las características mecánicas y eléctricas que los aisladores poliméricos de suspensión deben cumplir, así mismo, se enlistan todas las pruebas que se deben realizar a este tipo de aislador.

Para este estudio se han elegido las siguientes pruebas:

- **Prueba de disrupción en seco a baja frecuencia**

Se selecciona un aislador, el cual es sometido a la prueba y debe cumplir con los requisitos de la norma. El voltaje de disrupción obtenido experimentalmente, bajo las condiciones de prueba descritas en la norma ANSI/NEMA C29.11-2020, sea igual o superior al 95% del voltaje de disrupción nominal descrito en la norma ANSI/NEMA C29.13-2018 [9].

- **Prueba de disrupción en mojado a baja frecuencia**

Se selecciona un aislador, el cual es sometido a la prueba y debe cumplir con los requisitos de la norma. El voltaje de disrupción obtenido experimentalmente, bajo las condiciones de prueba descritas en la norma ANSI/NEMA C29.11-2020, sea igual o superior al 90% del voltaje de disrupción nominal descrito en la norma ANSI/NEMA C29.13-2018 [9].

Para cada una de las pruebas se ha construido un sistema de estudio en el software EMTP-RV, el cual permite obtener el voltaje de disrupción, el cual se debe comparar con los respectivos límites descritos en cada prueba.

Las principales características de interés para el estudio que se definen esta norma son las distancias de arco y de fuga del aislador, definidas en milímetros, y los voltajes nominales de disrupción en seco y en húmedo a baja frecuencia, dados en kilovoltios eficaces o rms.

Esta norma recomienda la aplicación de la norma ANSI/NEMA C29.11-2020 que especifica el procedimiento para realizar cada una de las pruebas, y los respectivos parámetros y factores de corrección que deben aplicarse a los resultados obtenidos experimentalmente.

La NTC 3275, es una norma técnica colombiana basada en la norma C29.13-2018 y se ha usado como soporte para la interpretación de ambas normas técnicas analizadas.

### **2.1.2 NORMA ANSI/NEMA C29.11-2020**

La norma técnica ANSI/NEMA C29.11-2020 comprende el manual de procedimientos que deben seguirse al momento de realizar pruebas a aisladores poliméricos.

Las pruebas que han sido seleccionadas para este estudio son clasificadas como pruebas de diseño por la norma técnica. Estas pruebas tienen como objetivo las características de un aislador polimérico que son dependientes en sus dimensiones y forma geométrica [14].

#### **2.1.2.1 PRUEBA DE DISRUPCIÓN EN SECO A BAJA FRECUENCIA**

##### **Aplicación de Voltaje:**

El voltaje en los terminales del aislador debe aplicarse de tal forma que el voltaje se incremente rápidamente hasta aproximadamente el 75% del valor nominal de voltaje de disrupción para esta prueba. La tasa continua de incremento de voltaje debe ser tal que el tiempo de disrupción no sea menor a 5 segundos y no mayor a 30 segundos luego de alcanzar el 75% del voltaje nominal de disrupción [14].

Para la aplicación de voltaje se considera dos fuentes en el sistema de prueba, la primera eleva el voltaje aplicado al aislador hasta un 75% del voltaje nominal de disrupción, la segunda eleva el voltaje aplicado al aislador desde el 75% del voltaje nominal con la particularidad de que en esta se puede controlar la tasa de incremento de voltaje y tendrá asociado un valor de incertidumbre sobre el valor que se haya elegido inicialmente.

Si la disrupción se presenta en un tiempo cercano a los límites del intervalo propuesto por la norma, se modifica el valor base de la tasa de incremento de voltaje. La finalidad es tener en cuenta el proceso real aplicado en un laboratorio de prueba de aisladores.

Ambas fuentes se configuran de modo que su voltaje esté en el orden de los kilovoltios y su tiempo en el orden de los segundos.

##### **Obtención del valor del voltaje de disrupción experimental:**

El voltaje experimental de disrupción en seco a baja frecuencia del aislador de prueba debe ser obtenido de la media aritmética de al menos 5 disrupciones realizadas

consecutivamente. Se debe esperar un intervalo de tiempo menor a 5 minutos y mayor a 15 segundos para asegurar un tiempo suficiente en el que el ozono producido por la disrupción pueda disiparse [14].

Para cumplir con lo indicado en esta sección de la norma técnica se han realizado al menos 5 pruebas a un mismo aislador en su respectivo sistema de estudio, en los casos donde se presenta un mayor número de pruebas es cuando la disrupción se presenta fuera del intervalo de tiempo indicado para la disrupción en la sección de aplicación de voltaje.

Debido a las limitaciones del software EMTP-RV se ha decidido que cada simulación de una disrupción sea independiente, para lo cual se asume que ha pasado el tiempo suficiente para la disipación del ozono alrededor del aislador, y que el tiempo entre pruebas está dentro del intervalo indicado para las disrupciones consecutivas.

La norma técnica aclara que debido a diversas condiciones no controlables que se introducen en las pruebas, como la inexactitud de los métodos de corrección, o las dificultades en la calibración de los equipos de medida, se debe esperar una variación del  $\pm 5\%$  en el valor obtenido cuando las pruebas se realicen en un solo laboratorio, y una variación del  $\pm 8\%$  cuando las pruebas se realicen en distintos laboratorios [14].

Esta variación ha sido implementada en el sistema de estudio, y afecta al voltaje de aplicación y a la curva voltaje tiempo de cada aislador. Se afecta a la tasa de incremento del voltaje de aplicación y a la característica voltaje tiempo con la generación de valores aleatorios que siguen una distribución estadística normal. Esta variación es una de las condiciones de laboratorio que se ha contemplado incluir en la simulación.

- **Corrección por Condiciones Ambientales Estándar**

Para la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia se deben tener en cuenta los valores considerados en la Tabla 2.1 como condiciones ambientales estándar.

**Tabla 2.1** Condiciones ambientales normales para la prueba de disrupción en seco [14].

	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Presión barométrica	100.86	kPa
Temperatura	25	°C
Humedad absoluta	15	g/m <sup>3</sup>

Los valores de prueba ( $V_p$ ) obtenidos bajo condiciones atmosféricas locales deben ser corregidos a valores de prueba ( $V_s$ ) bajo condiciones atmosféricas estándar. La relación matemática para esta corrección se expresa en la Ecuación (2.1).

$$V_s = V_p \left( \frac{k_h}{k_d} \right) \quad (2.1)$$

Los factores de corrección por humedad ( $k_h$ ) y por densidad relativa del aire ( $k_d$ ) se calcularon de acuerdo con la norma técnica como se indica en las siguientes secciones.

- **Corrección por Humedad Ambiental**

Para el cálculo del factor de corrección por humedad ( $k_h$ ) se debe utilizar la Ecuación (2.2).

$$P_h = cAT \quad (2.2)$$

En donde:

$P_h$  = Presión de vapor atmosférica en kPa a la temperatura T en K.

A = Humedad absoluta en g/m<sup>3</sup>.

c = constante de corrección por humedad ambiental.

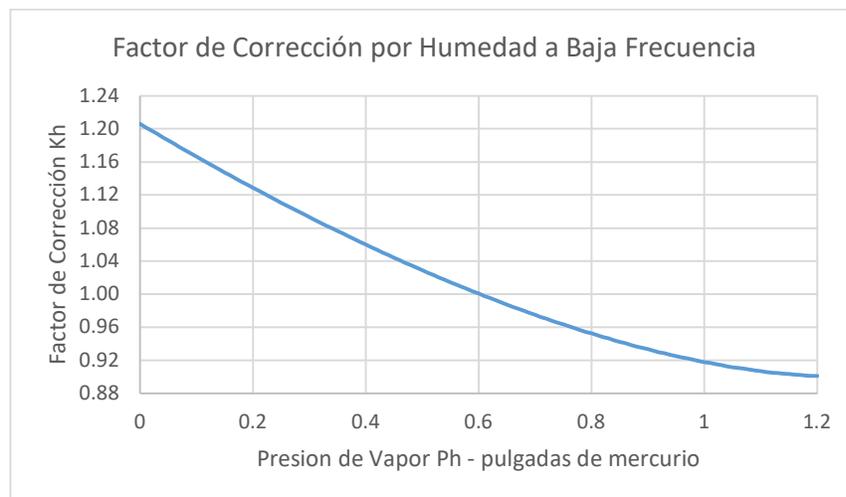
Para unidades del SI, la Ecuación (2.2) se configura como se muestra en la Ecuación (2.3).

$$P_h = 4.615 * 10^{-4} * A * (t + 273) \text{ kPa} \quad (2.3)$$

En donde:

t = temperatura del aire en grados Celsius

Luego de calcular el valor de la presión de vapor atmosférica  $P_h$ , se debe obtener el valor de  $k_h$  a partir de la Figura 2.1.



**Figura 2.1** Factor de Corrección por Humedad a Baja Frecuencia [14].

La norma técnica define los valores de presión de vapor  $P_h$  de la Figura 2.1 en pulgadas de mercurio, por lo cual es necesario dividir el valor obtenido de la Ecuación (2.3) en kilo pascuales por un factor de 3.38639 para obtener el valor adecuado en pulgadas de mercurio, como se muestra en la Ecuación (2.4).

$$P_h[inHg] = \frac{1}{3.38639} P_h [kPa] \quad (2.4)$$

La norma técnica aclara que para valores de  $P_h$  mayores a 0.7 en la Figura 2.1, se debe tener en cuenta que la exactitud de los valores obtenidos será menor.

- **Corrección por Densidad del Aire**

El factor de corrección por densidad de aire se calcula con la relación matemática de la Ecuación (2.5), la cual se considera para unidades del SI.

$$k_d = 2.94 \frac{P}{273+t} \quad (2.5)$$

En donde:

$P$  = presión barométrica en kPa

$t$  = temperatura del aire en grados Celsius

Para la aplicación y cálculo de los valores de estas correcciones se ha usado las condiciones ambientales locales de la ciudad de Quito.

### **2.1.2.2 PRUEBA DE DISRUPCIÓN EN HÚMEDO A BAJA FRECUENCIA**

#### **Aplicación de Voltaje:**

Luego de no menos de un minuto del ajuste final del rocío sobre el aislador, el voltaje aplicado debe ser rápidamente incrementado hasta alcanzar el 75% del valor nominal de voltaje de disrupción en húmedo. La tasa continua de incremento de voltaje debe ser tal que el tiempo de disrupción no sea mayor a 5 segundos y no menor a 30 segundos luego de alcanzar el 75% del voltaje nominal de disrupción [14].

La precipitación por el rocío sobre el aislador se ha interpretado como una variación en la resistencia en paralelo del modelo estático del aislador, Figura 1.6.

#### **Obtención del valor del voltaje de disrupción experimental:**

El valor experimental del voltaje de disrupción de disrupción en húmedo a baja frecuencia del aislador de prueba debe ser obtenido de la media aritmética de al menos 5 disrupciones

realizadas consecutivamente. Se debe esperar un intervalo de tiempo menor a 5 minutos y mayor a 15 segundos [14].

Debido a la similitud entre las pruebas de disrupción en seco y húmedo a baja frecuencia se ha utilizado un procedimiento similar para su implementación.

La norma técnica aclara que debido a diversas condiciones no controlables que se introducen en las pruebas, como las variaciones que se presentan en la aplicación del rocío sobre el aislador, la inexactitud de los métodos de corrección, o las dificultades en la calibración de los equipos de medida, se debe esperar una variación del  $\pm 8\%$  en el valor obtenido cuando las pruebas se realicen en un solo laboratorio, y una variación del  $\pm 12\%$  cuando las pruebas se realicen en distintos laboratorios [14].

- **Corrección por Condiciones Ambientales Estándar**

En este caso las correcciones que se deben realizar son las mismas que en el caso de la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia, sin embargo, se debe ignorar el factor de corrección por humedad ambiental, de este modo, la relación matemática de la corrección se muestra en Ecuación (2.6).

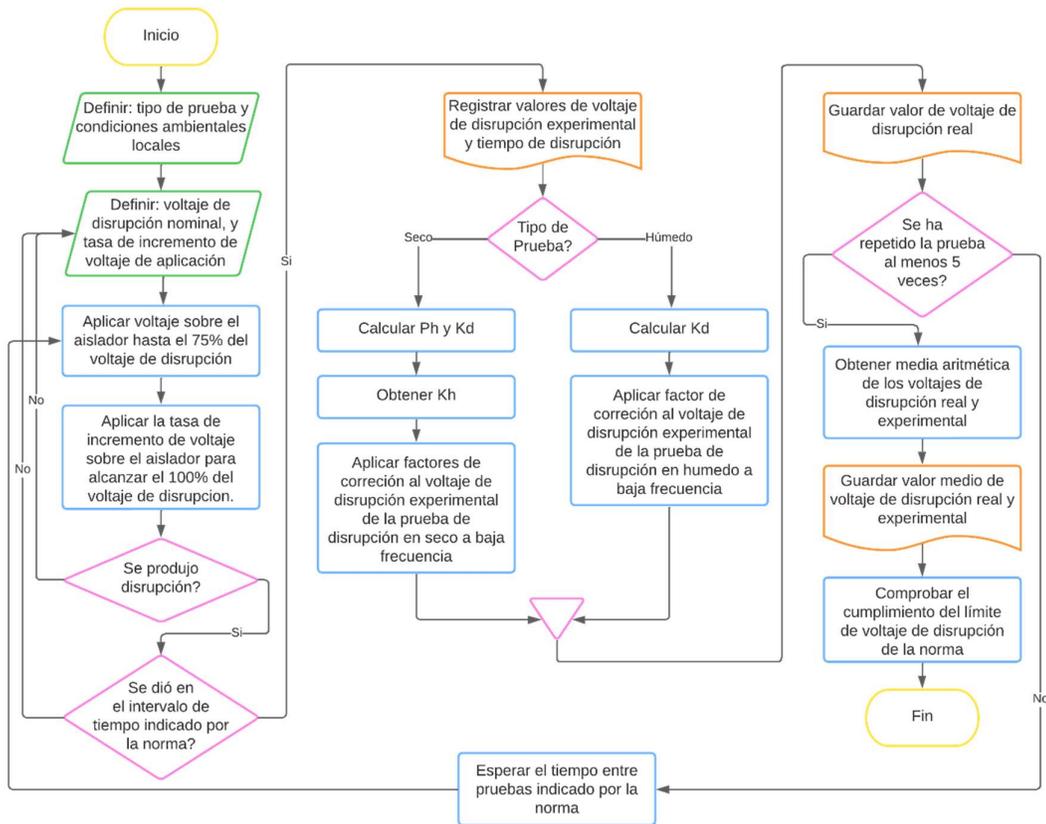
$$V_s = V_p \left( \frac{1}{k_d} \right) \quad (2.6)$$

### **2.1.3 DIAGRAMA DE INTERPRETACIÓN DE LAS NORMAS TÉCNICAS**

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de flujo resultado de la interpretación de las normas ANSI/NEMA C.29.13-2018 y C.29.11-2020.

Las consideraciones que se han tomado para la aplicación de las pruebas en el modelo del aislador implementado consisten en:

- Siempre se producirá disrupción cuando el voltaje de aplicación supere el umbral de la característica voltaje tiempo del aislador.
- El tiempo entre pruebas ha sido omitido debido a las limitaciones de simulación de EMTP-RV, es decir, el tiempo entre pruebas siempre está dentro del intervalo indicado por la norma.
- En la aplicación del 0% al 75% del voltaje de disrupción nominal, la norma indica que se incremente rápidamente, por lo cual, se ha decidido usar un tiempo del 10% del valor límite inferior del intervalo de tiempo en el que la prueba es aceptable. Este valor recibe el nombre de tiempo de coordinación y tiene un valor de 0.5 segundos.



**Figura 2.2** Diagrama de Interpretación de las Normas Técnicas de Prueba de Aisladores Poliméricos de Suspensión.

Este diagrama se ha considerado como línea base para la modelación del sistema de estudio en el software EMTP-RV.

## 2.2 MODELADO EN EL SOFTWARE EMTP-RV

El sistema de estudio utilizado en este trabajo de integración curricular ha sido implementado en el software EMTP-RV, con el uso de sus recursos para la modelación de circuitos eléctricos y de control.

Los principales elementos que se han utilizado para la modelación del sistema de estudio son elementos eléctricos activos y pasivos, sondas de medición, elementos digitales de control y el bloque de interfaz con el software Simulink de MATLAB.

En el **ANEXO III** se describe la metodología utilizada para la implementación de la Interfaz de EMTP-RV con Simulink de MATLAB y la creación de subsistemas y su enmascaramiento.

A continuación, se detalla cómo se ha utilizado los elementos disponibles en EMTP-RV para la modelación de los diferentes elementos usados en el sistema de pruebas.

### 2.2.1 MODELACIÓN DEL AISLADOR

Para la modelación del aislador ANSI DS-15 se ha decidido combinar el modelo real de estado estacionario con el modelo dinámico basado en una característica voltaje tiempo. Este modelo se ha decidido debido a las pruebas que se realizaran en el entorno de simulación de EMTP-RV.

El modelo del aislador se ha construido de modo que se presenta la resistencia y la capacitancia del aislador en estado estacionario, un interruptor normalmente abierto controlado por voltaje que se encuentra asociado a una curva voltaje tiempo, y estos 3 elementos se encuentran conectados en paralelo, y la resistencia del arco eléctrico, la cual se encuentra conectada en serie al paralelo de los 3 elementos ya mencionados.

El interruptor controlado por voltaje se ha implementado en EMTP-RV, con el uso del elemento de interruptor controlado, el cual tiene 2 terminales de potencia que se conectan al resto de elementos eléctricos, y una entrada digital que se conecta al circuito de control que determina su comportamiento. Este elemento presenta el siguiente comportamiento:

- Interruptor abierto cuando la señal de control tiene un valor menor o igual a cero.
- Interruptor cerrado cuando la señal de control tiene un valor mayor que cero.

En este modelo se alimenta los terminales del aislador con el voltaje de aplicación, del mismo se toma una señal de medición digital, la cual es comparada con la curva voltaje tiempo del aislador en estudio. La comparación se consigue con el uso del bloque de comparación de EMTP-RV, el cual tiene el siguiente comportamiento:

- Salida en 1 – Cuando valor en entrada 1 es mayor a valor en entrada 2.
- Salida en 0 – Cuando valor en entrada 1 es igual a valor en entrada 2.
- Salida en -1 – Cuando el valor en entrada 1 es menor a valor en entrada 2.

En la entrada 1 del bloque de comparación se ha conectado la medición digital del voltaje de aplicación, en la entrada 2 se ha conectado la curva de voltaje tiempo. De este modo, cuando el voltaje de aplicación aún no ha superado al valor de la curva voltaje tiempo, la señal se mantiene en -1, lo cual mantiene el interruptor abierto, y representa el estado en el que el aislador aún no ha sufrido la disrupción. En el momento que el voltaje de aplicación supera el umbral de la curva voltaje tiempo, la señal cambia a 1, con lo que se cierra el interruptor y el modelo se encontraría en la simulación de la disrupción del aislador por una solicitud de sobrevoltaje en sus terminales. Al momento que se presenta la disrupción,

los elementos eléctricos que representan el modelo real en estado estacionario son cortocircuitados por el interruptor controlado por voltaje, de modo que cuando se produce la disrupción, solamente se tiene en cuenta el modelo dinámico del aislador.

El modelo del aislador ha sido consolidado dentro de un subsistema. Las entradas son los terminales de la fuente de aplicación de voltaje, la medición digital del voltaje aplicado al aislador y la salida es la señal de control que indica la disrupción total del aislador.

Es importante considerar que la medición digital del voltaje aplicado al aislador se toma directamente de la fuente de prueba, lo cual se ha decidido de modo que se consiga modelar adecuadamente el comportamiento del aislador al momento de la disrupción.

Los valores de los elementos eléctricos y de las variables aleatorias asociadas al modelo dinámico del aislador se han ingresado con el uso de la máscara "Simple Black Box".

Para la implementación de la característica voltaje tiempo del aislador se ha utilizado la interfaz de EMTP-RV con Simulink con el uso del bloque Simulink DLL.

### **2.2.1.1 OBTENCIÓN DE LA CARACTERÍSTICA VOLTAJE – TIEMPO**

El comportamiento del interruptor controlado por voltaje del modelo del aislador se encuentra determinado por la característica voltaje tiempo del aislador. En la sección 1.4.9 de este documento, se menciona la Ecuación (1.1), la cual se ha utilizado para obtener los valores de la curva voltaje tiempo que será utilizada en el modelo del aislador.

La Ecuación (1.1) tiene 2 parámetros de entrada, las constantes  $A$  y  $B$ , las cuales han sido ajustadas para el aislador de cada caso de estudio. El valor del tiempo  $t_b$  debe tener unidades de segundos y el voltaje de disrupción  $U_b$  debe tener unidades de kilovoltios.

En cada uno de los casos de estudio definidos los valores de  $A$  y  $B$  son diferentes. Esto es una consecuencia de obtener numéricamente dichos valores. Para ello se resuelve un sistema de ecuaciones que tiene como incógnitas las variables  $A$  y  $B$ , y los valores conocidos son los correspondientes a  $t_b$  y  $U_b$ .

Luego de obtener los valores de  $A$  y  $B$  para cada caso, se ha tabulado los valores de  $t_b$  y  $U_b$ . Se han dado valores para el tiempo de disrupción  $t_b$  desde  $t=0s$  hasta  $t=50s$  en pasos de  $\Delta t=0.01s$ , y se obtenido los valores correspondientes de  $U_b$  para cada paso de tiempo.

Finalmente, se obtiene una tabla de valores con los valores de tiempo y voltaje de disrupción correspondientes a la característica voltaje tiempo del caso de estudio del aislador en análisis.

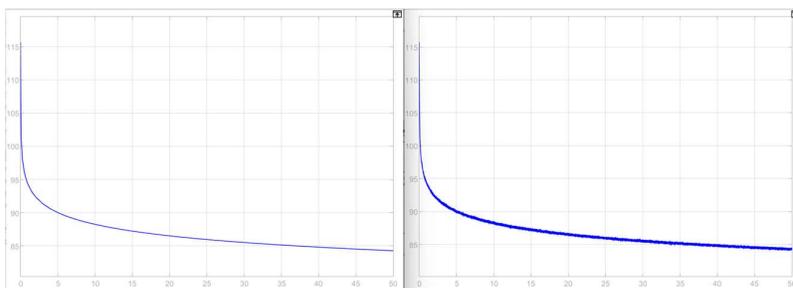
### 2.2.1.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA VOLTAJE – TIEMPO EN EMTP-RV

Tras haber obtenido la tabla de valores de la característica voltaje tiempo se ha implementado dicha tabla en el software EMTP-RV como una señal digital para controlar el comportamiento del interruptor controlado por voltaje.

Para la implementación se ha utilizado el bloque de Simulink DLL del software EMTP-RV. De este modo, se ha construido un modelo en Simulink, donde se carga la tabla de valores de la característica voltaje tiempo, desde el espacio de trabajo (“Workspace”) de MATLAB.

Para tener en cuenta la característica aleatoria de la curva voltaje tiempo, lo cual se analiza en la sección 1.4.8, se ha implementado en Simulink una forma de replicar el efecto aleatorio sobre la curva voltaje tiempo, con el uso del bloque de generación de números aleatorios de Simulink, el cual genera números aleatorios que siguen una distribución estadística normal. Este bloque se ha configurado con una media igual a cero y una varianza igual a uno, valores configurados por defecto, y se ha decidido usar una variable sintonizable para el valor de la raíz aleatoria, de modo que en cada simulación de una prueba al aislador se pueda cambiar el valor de dicha variable.

La forma en que los valores generados aleatoriamente afectan a la curva voltaje tiempo consiste en tomar los valores de la curva voltaje tiempo y multiplicarlos por los valores aleatorios y por el valor de una ganancia, la cual será configurada como una variable sintonizable, y dicha multiplicación sumarla a los valores originales de la curva voltaje tiempo. El valor de la ganancia permite controlar en que magnitud los valores aleatorios afectan a la curva voltaje tiempo, por defecto se ha elegido un valor de 0.001.



(a)

(b)

**Figura 2.3** a) Curva Voltaje Tiempo Original b) Curva V-t afectada por valores aleatorios.

En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de cómo se afecta a la curva voltaje tiempo original con valores aleatorios de modo que se consiga replicar una forma similar a lo mostrado en la Figura 1.8.

Una vez obtenida la nueva curva voltaje tiempo afectada por valores aleatorios en Simulink se procede a generar el archivo .dll, el cual, una vez obtenido, debe ser cargado en un bloque Simulink DLL en EMTP-RV, y su salida debe conectarse a la entrada 2 del bloque comparador del modelo del aislador.

Tras implementar la característica voltaje tiempo se completa el modelo del aislador. Esta curva debe ser diferente para las pruebas de interrupción en seco y en húmedo.

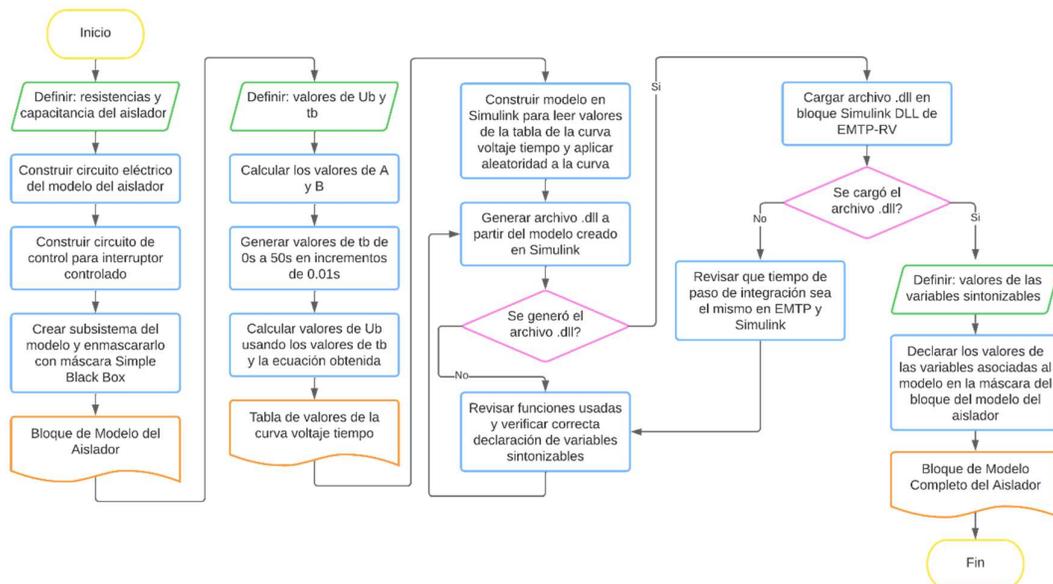
El bloque de Simulink DLL que genera la curva voltaje tiempo se ha colocado dentro de un subsistema junto con los elementos para modelar las correcciones por condiciones ambientales, debido a la influencia de dichas condiciones sobre el voltaje de interrupción.

El subsistema de la curva voltaje tiempo en condiciones ambientales locales e ideales, cuenta con dos salidas y no será enmascarado, debido a que este será un bloque anidado dentro del subsistema del modelo del aislador, cuya interfaz de máscara si contará con las variables declaradas para las condiciones ambientales.

Esto se ha realizado con la finalidad de reducir la complejidad del modelo en EMPT-RV.

La modelación de las condiciones ambientales se describe en la sección 2.2.3.2.

### 2.2.1.3 DIAGRAMA DE MODELACIÓN DEL AISLADOR



**Figura 2.4** Diagrama de flujo para modelación del aislador.

En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de flujo que describe el proceso utilizado para la modelación del aislador en el software EMTP-RV.

## 2.2.2 MODELACIÓN DE LA FUENTE DE PRUEBA

La modelación de la fuente de voltaje para las pruebas de disrupción en seco y en húmedo a baja frecuencia se ha realizado siguiendo los lineamientos de las normas técnicas, lo cual se ha analizado en la sección 2.1.2.

En ambas pruebas a realizarse se ha utilizado fuentes de voltaje continuo en lugar de voltaje alterno, esto se ha decidido debido a que, en la práctica, para generar altos voltajes se suele rectificar el voltaje alterno con el uso de semiconductores de alto voltaje, o se utiliza circuitos multiplicadores de voltaje, o ambos [15]. La norma técnica especifica el valor de los voltajes de disrupción para las pruebas de disrupción en húmedo y en seco en términos de valor eficaz o rms, por lo cual se ha hecho equivalencia con voltaje continuo.

Inicialmente se debe elevar el voltaje aplicado al aislador hasta el 75% del valor de disrupción nominal. Para esto se ha utilizado una fuente de voltaje tipo rampa lineal, los parámetros de esta fuente son el tiempo inicial ( $t_{start}$ ), el tiempo en el que se alcanza el voltaje máximo ( $t_0$ ), el voltaje máximo ( $V_m$ ), y el tiempo de parada ( $t_{stop}$ ).

Debido a que esta fuente corresponde a la aplicación inicial de voltaje, el tiempo inicial se ha configurado con un valor igual a 0 y el tiempo de parada con un valor de 100 segundos, lo cual considera el límite de 30 segundos y que voltaje debe aplicarse hasta la disrupción. Los otros dos parámetros de esta fuente se han configurado como variables que son declaradas en la respectiva máscara del subsistema de la fuente.

El tiempo en el que se alcanza el voltaje máximo, como se indica en la sección 2.1.3, se configura con el tiempo de coordinación y el voltaje máximo se configura con el valor del 75% del voltaje de disrupción nominal.

Para elevar el voltaje de aplicación desde el 75% del valor nominal se ha utilizado una fuente controlada de voltaje con una característica lineal de crecimiento, sin embargo, en dicha fuente se podrá variar la pendiente con la que crecerá el voltaje aplicado.

Al valor de la pendiente de crecimiento del voltaje aplicado se le ha llamado *Tasa de Incremento de Voltaje (TIV)* en este trabajo de integración curricular.

La fuente controlada de voltaje tiene dos parámetros el tiempo inicial ( $t_{start}$ ) y el tiempo de parada ( $t_{stop}$ ). El tiempo de parada se configurado en 100 segundos, y el tiempo inicial se declara desde la máscara del subsistema de este elemento con el tiempo de coordinación.

La tasa de incremento de voltaje se ha modelado con el uso de un bloque de constante en serie a un bloque de integración en serie a un bloque de retraso en tiempo y la salida de

dicho bloque se conecta a la entrada de control de la fuente de voltaje. Al integrar una constante se obtiene una función lineal, cuya pendiente es el valor de la constante. El retraso en tiempo se aplica para coordinar en tiempo la operación de la fuente de voltaje tipo rampa lineal de la aplicación inicial de voltaje con la fuente controlada de voltaje.

Se debe tener en cuenta que el valor introducido en la constante de la *Tasa de Incremento de Voltaje* tiene unidades de kilovoltios por segundo (kV/s).

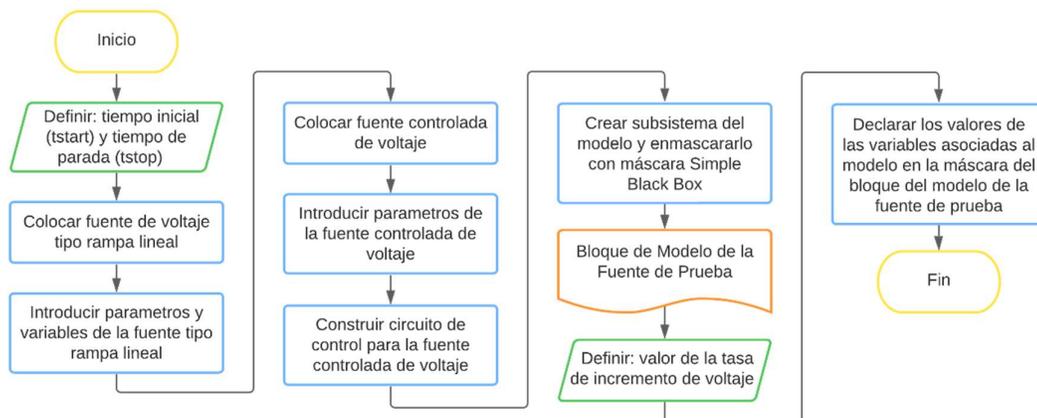
La fuente de voltaje tipo rampa lineal y la fuente controlada de voltaje se han conectado en serie de modo que alimentan simultáneamente al resto del circuito eléctrico.

El subsistema que contiene al modelo de la fuente tiene dos terminales eléctricos que corresponden a las terminales de una fuente de voltaje, y una entrada digital conectada al bloque de constante, que modifica la tasa de incremento de voltaje de la fuente controlada.

La máscara del bloque de subsistema usada para el modelo de la fuente es la “Simple Black Box”, en la cual se declaran dos variables, el 75% del voltaje de disrupción nominal y el tiempo de coordinación.

### 2.2.2.1 DIAGRAMA DE MODELACIÓN DE LA FUENTE DE PRUEBA

En la Figura 2.5 se presenta el diagrama de flujo utilizada para la modelación de la fuente de prueba que servirá para aplicar voltaje al aislador para la simulación de las pruebas de disrupción en seco y en húmedo a baja frecuencia.



**Figura 2.5** Diagrama de flujo de la modelación de la fuente de prueba.

La *Tasa de Incremento de Voltaje (TIV)* es un valor que se introduce de manera aislada al modelo de la fuente de prueba, no en la interfaz de la máscara del modelo, esto con la finalidad de poder visualizar directamente cuál es su valor al momento de simular.

## **2.2.3 MODELACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LABORATORIO**

En esta sección se describe el proceso para modelar otros aspectos importantes que se tienen en cuenta para el modelado del sistema de estudio para la simulación de las pruebas al aislador ANSI DS-15. Se ha considerado los equipos de protección de laboratorio, y las condiciones ambientales del laboratorio donde se realiza la prueba de aisladores.

### **2.2.3.1 PROTECCIÓN DE EQUIPOS DE LABORATORIO**

En cuanto a protección de equipos de laboratorio se ha considerado la guía para prácticas del laboratorio de alto voltaje de la Escuela Politécnica Nacional. [15] Se ha incluido en el modelo una resistencia limitadora de corriente que protege al transformador de alto voltaje contra las altas corrientes producidas por las disrupciones, y el interruptor principal que corta la alimentación al transformador de alto voltaje, este es de acción manual y se ha modelado como un interruptor controlado que utiliza la señal del modelo del aislador que indica la disrupción completa del aislador. Ambos elementos se conectan en serie y se colocan entre el modelo de la fuente de prueba y el modelo del aislador, y son un enlace entre ambos modelos y conforman el circuito completo del sistema de estudio para pruebas de aisladores.

La señal utilizada para abrir el interruptor controlado corresponde a la señal del modelo del aislador que indica la disrupción completa. Debido al comportamiento del interruptor controlado, el cual se describe en la sección 2.2.1, es necesario procesar dicha señal para obtener el comportamiento adecuado de este interruptor.

Se ha creado un subsistema que comprende elementos de control que permiten procesar la señal de disrupción completa, y se hace uso de la máscara "Simple Black Box".

La señal deseada se obtiene con el uso de un bloque de retraso al encendido, el cual al recibir un cambio de 1 a 0 espera un tiempo de retraso, el cual se configura desde la máscara del subsistema, y luego, un comparador permite invertir la señal de modo que, cuando se produce la disrupción completa, la señal que indica la disrupción completa cambia de 1 a 0, y el bloque de retraso al encendido opera, y espera el tiempo de retraso para cambiar de 1 a 0 la señal en la entrada 2 del bloque comparador y debido a que el comparador fue configurado como inversor, la señal cambia de 0 a 1, y se produce la apertura del interruptor controlado y por lo tanto la finalización de una prueba.

La razón por la que se modela con un tiempo de retraso a la apertura del interruptor con respecto al tiempo en el que se produce la disrupción completa consiste en que, en un laboratorio físico, la apertura se acciona de forma manual, es decir, es el tiempo de reacción

del operador que realiza la prueba en el tablero de control del laboratorio de alto voltaje al momento de presenciar la disrupción y seguidamente accionar el interruptor principal de la fuente de alimentación. Debido a ello, se ha establecido el tiempo de retraso a la apertura del interruptor controlado como una variable definida por el usuario.

### 2.2.3.2 CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones ambientales locales del laboratorio donde se realizan las pruebas de aisladores son un factor que se ha tomado en cuenta en el modelo del sistema de estudio, ya que estas condiciones alteran directamente al valor del voltaje de disrupción, y, por lo tanto, al desempeño del aislador en las pruebas.

La corrección por condiciones ambientales se ha modelado dentro del bloque de modelo del aislador, esto se ha realizado para aprovechar de mejor manera el bloque de Simulink DLL, ya que es más fácil procesar valores puntuales en el software Simulink. La corrección debe ser aplicada a la característica voltaje tiempo, ya que el voltaje de disrupción depende de las condiciones ambientales locales del laboratorio donde se realiza la prueba.

Los factores de corrección para ambas pruebas se tratan de una manera similar. Se introducen los datos de humedad en  $\text{g/cm}^3$ , temperatura en grados Celsius y presión atmosférica en kPa en la interfaz de la máscara del bloque de modelo del aislador. Con el uso de estos valores, el bloque Simulink DLL calcula el valor de la presión de vapor local  $P_h$  y del factor de corrección por densidad del aire  $k_d$ , y junto con la característica voltaje tiempo, y son las 3 salidas del primer bloque Simulink DLL usado para este modelo.

El factor de corrección por humedad se obtiene a través de la presión de vapor  $P_h$  y de la Figura 2.1. Esto se ha modelado en EMTP-RV con el uso del bloque de tabla de funciones, el cual permite cargar manualmente una tabla de valores X y Y. Este bloque toma en su entrada un valor, lo interpreta como X y devuelve a la salida el valor respectivo de Y. Este bloque realiza una interpolación para valores de X no disponibles en la tabla ingresada. Los valores XY de este bloque corresponden con los valores de la Figura 2.1. A la salida del bloque tabla de valores se obtiene el valor del factor de corrección por humedad  $k_h$ .

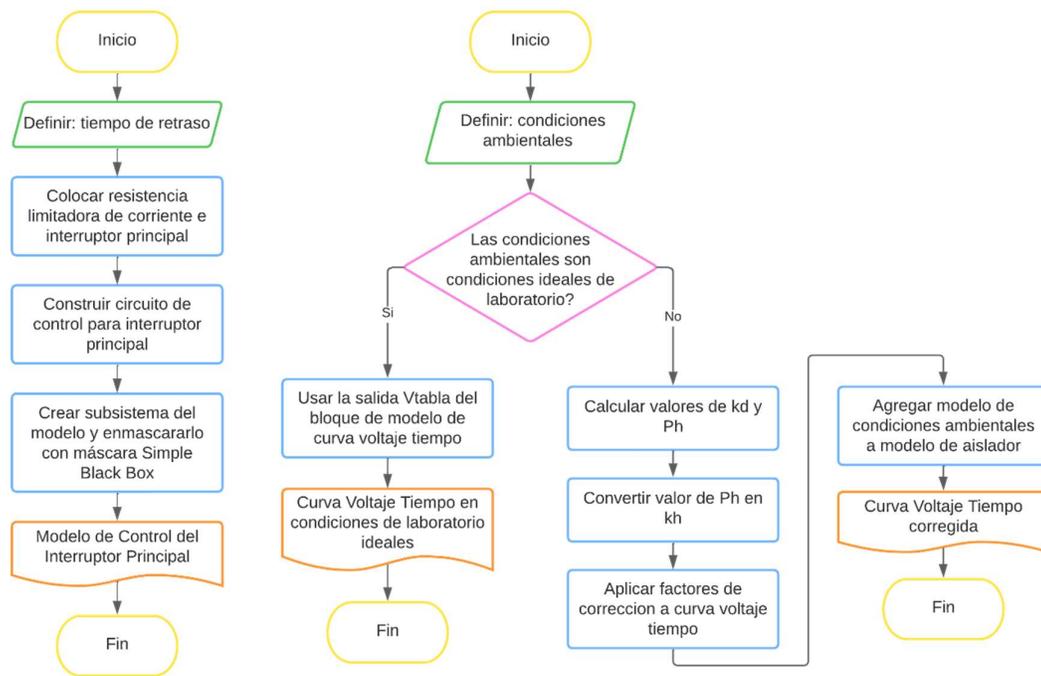
Finalmente, con el uso de otro bloque Simulink DLL, que tiene como entrada la curva voltaje tiempo, el factor de corrección por humedad  $k_h$  y el factor de corrección por densidad del aire  $k_d$ , se obtiene dos salidas, la curva voltaje tiempo experimental, que indica el valor al que se produce la disrupción bajo las condiciones ambientales locales, y es la usada por defecto en el sistema de estudio, y la curva voltaje tiempo real, que indica el verdadero valor al que se debería producir la disrupción según la norma técnica.

Este modelo tiene la finalidad de reproducir las condiciones ambientales de laboratorios en diferentes ubicaciones geográficas y no solo las del laboratorio de alto voltaje en estudio.

En caso de que las condiciones ambientales locales sean iguales a las ideales, presentadas en la Tabla 2.1, se debe usar la curva voltaje tiempo sin corrección, e ignorar la que ha sido corregida, ambas salidas se encuentran disponibles en el bloque de modelo de la curva voltaje tiempo y por defecto se usa la curva aplicada la corrección.

### 2.2.3.3 DIAGRAMA DE MODELACIÓN DE LAS CONDICIONES DE LABORATORIO

En la Figura 2.6 se presenta el diagrama de flujo que describe el proceso de modelación de las condiciones del laboratorio de prueba en el software EMTP-RV.



**Figura 2.6** Diagrama de flujo de modelación de condiciones de laboratorio.

El modelo de las condiciones ambientales va incluido en el modelo del aislador, y las variables de condiciones ambientales se declaran en la máscara del modelo del aislador.

La protección de equipos de laboratorio comprende dos elementos eléctricos y un subsistema para control del interruptor principal del sistema, estos tienen la función de permitir la conexión, y posterior desconexión, de los modelos de la fuente y del aislador.



eléctricas para el respectivo análisis de resultados. De la gráfica de la señal que indica la disrupción del aislador, se anota el tiempo estimado en que se produce la disrupción.

Finalmente, se exportan los valores de las gráficas con el uso de la herramienta de exportación a archivo de texto de ScopeView, una vez generado este archivo se lo debe tabular para su posterior análisis.

En la Figura 2.7 se presenta el diagrama de flujo que describe el proceso de simulación utilizado para la aplicación de las pruebas en cada caso de estudio.

## 2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados de simulación de todos los casos de estudio, se procede con la tabulación y el cálculo del valor promedio de los voltajes de disrupción experimental y real. Dicho valor promedio es utilizado para determinar si el aislador pasa o no la prueba correspondiente, teniendo en consideración los límites establecidos por la norma. Los datos de la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia y de la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia se presentan en tablas separadas.

Para complementar los resultados se ha realizado un análisis estadístico en el que se determina un intervalo de incertidumbre el voltaje de disrupción real y una prueba de hipótesis para comprobar si el aislador, de cada caso de estudio, pasa las pruebas.

### 2.4.1 DETERMINACIÓN DE INTERVALO DE INCERTIDUMBRE

En cada caso de estudio se ha simulado 5 veces para cada prueba. El tamaño de muestra en cada caso será de  $n = 5$ . Considerando el tamaño de muestra, lo más idóneo es el uso de la distribución t de Student para los cálculos.

El nivel de confianza tiene un valor de 5% en la prueba de disrupción en seco y de 8% en la prueba de disrupción en húmedo. Esto se ha considerado al tener en cuenta que la norma indica este valor de incertidumbre en la aplicación de cada prueba.

Se ha calculado la desviación estándar usando la Ecuación (2.7). En donde  $\bar{X}$  es el valor promedio de la muestra y  $X_i$  es el valor obtenido en cada prueba.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\bar{X} - X_i)^2}{n}} \quad (2.7)$$

Con el tamaño de muestra se obtiene los grados de libertad con un valor de 4. A partir de los datos recopilados, el estadístico de prueba tiene un valor de 2.7765 para la prueba en seco, y de 2.3896 para la prueba en húmedo. Con estos valores se aplica la ecuación 1.2.

## 2.4.2 APLICACIÓN DE PRUEBA DE HIPOTESIS

De forma similar a la determinación del intervalo de incertidumbre, se considera una distribución t de Student con un tamaño de muestra de  $n = 5$ . El nivel de confianza para la prueba en seco es de 5% y para la prueba en húmedo de 8%.

La hipótesis nula considera el intervalo de valores superiores al voltaje de disrupción nominal multiplicado por el límite de aceptación de la norma, 95% en la prueba en seco y 90% en la prueba en húmedo. La hipótesis alternativa considera el intervalo inferior a dicho valor.

Con este planteamiento se considera una distribución de una sola cola a la izquierda de la distribución normal. Luego se obtiene el valor del estadístico de prueba a partir de los datos de las 5 pruebas y se lo compara con el valor límite de la distribución t resultante del nivel de confianza y de los grados de libertad, que en este caso tienen un valor igual a 4.

Finalmente se acepta o rechaza la hipótesis nula y se determina si el aislador del caso de estudio pasa la prueba bajo los lineamientos de la norma técnica.

## 2.4.3 DIAGRAMA DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 2.8 se presenta el diagrama flujo de análisis de resultados, en donde se describe el proceso de tabulación de resultados y verificación propio de la norma junto con el análisis estadístico complementario que se ha aplicado a cada caso de estudio.

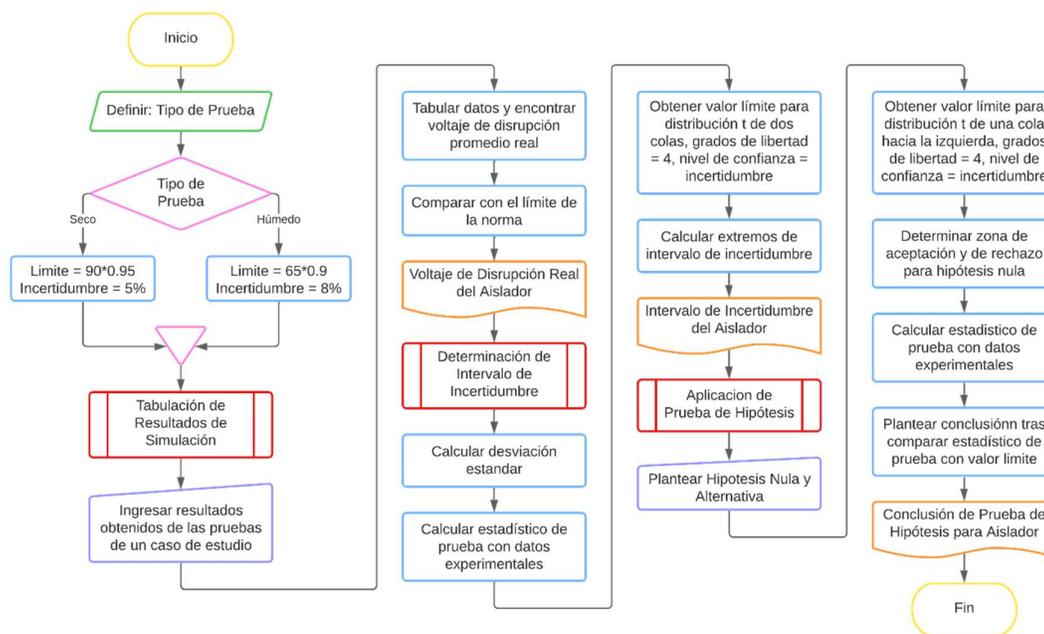


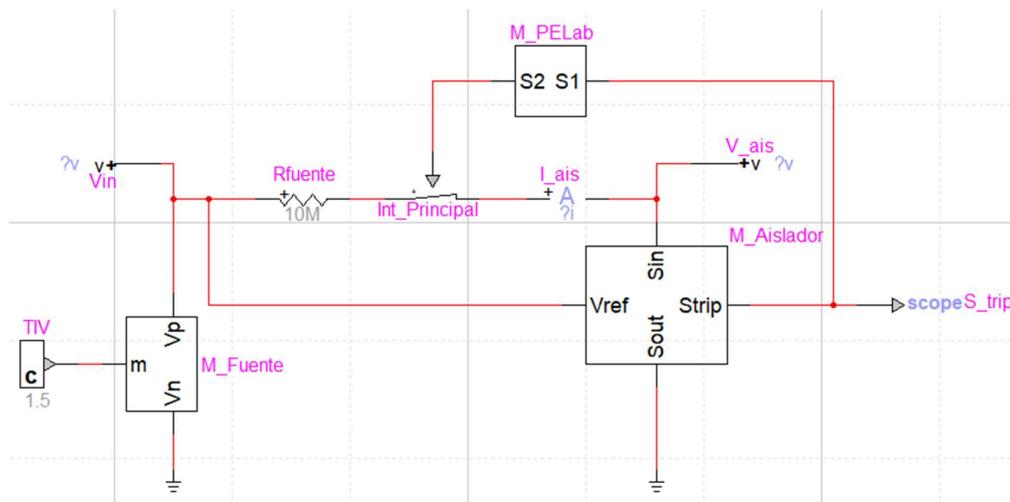
Figura 2.8 Diagrama de Análisis de Resultados

### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presenta el sistema de estudio implementado con los valores definidos para cada uno de los elementos que se han utilizado dentro de cada uno de los modelos presentados en el capítulo de metodología. Así mismo, se presentan los resultados obtenidos de la simulación para los casos de estudio que se han planteado. Tras tabular los resultados de la simulación de las pruebas para los casos de estudio, se ha aplicado un análisis estadístico a los resultados para corroborar lo indicado en la norma técnica.

#### 3.1 RESULTADOS

##### 3.1.1 SISTEMA DE ESTUDIO



**Figura 3.1** Modelo completo del sistema de estudio en EMTP-RV.

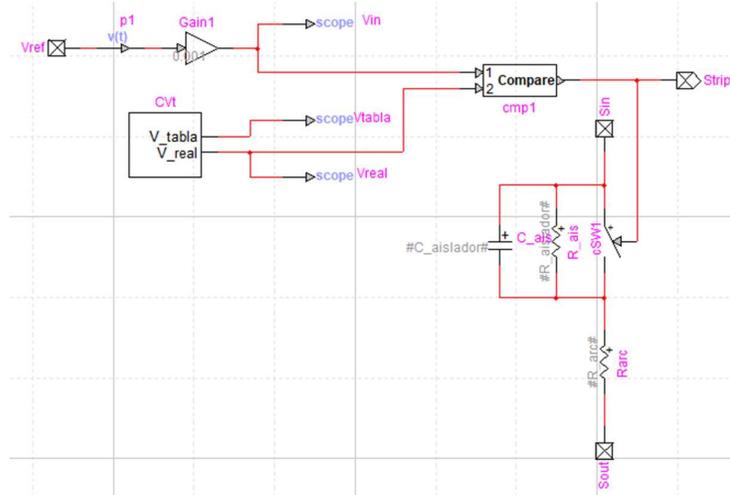
En la Figura 3.1 se presenta el modelo del sistema de estudio para la simulación de las pruebas del aislador ANSI DS-15. Este modelo se ha desarrollado con el procedimiento indicado en la norma ANSI/NEMA C.29.11-2020, y las características de un laboratorio de alto voltaje en donde se realizan las pruebas a aisladores.

Debido a que se ha agrupado en bloques de subsistema cada uno de los modelos, es posible presentar un solo modelo base, el cual es utilizado para la prueba de interrupción en seco a baja frecuencia y para la prueba de interrupción en húmedo a baja frecuencia. Las diferencias entre modelos principalmente se encuentran en el bloque de modelo del aislador, ya que entre ambas pruebas los valores de los elementos eléctricos, la característica voltaje tiempo y las correcciones ambientales que se aplican, son diferentes.

En las siguientes secciones se describe los detalles de cada uno de los modelos.

### 3.1.1.1 MODELO DEL AISLADOR ANSI DS-15

La forma en la que se implementó el modelo del aislador permite utilizar el mismo modelo para las dos pruebas, esto es gracias al bloque CVt, que tiene una configuración diferente para cada prueba. En la Figura 3.2 se presenta el modelo del aislador ANSI DS-15.



**Figura 3.2** Modelo del Aislador ANSI DS-15 implementado en EMTP-RV.

Los elementos que componen este modelo son:

Modelo estático del aislador:

- $C_{ais}$  = capacitancia del aislador en estado estacionario.
- $R_{ais}$  = resistencia del aislador en estado estacionario.

Modelo dinámico del aislador:

- CVt = bloque de característica voltaje tiempo.
- Cmp1 = bloque comparador.
- Gain1 = ganancia para convertir medición digital de voltaje de voltios a kilovoltios.
- cSW1 = interruptor controlado por voltaje.
- $R_{arc}$  = resistencia del arco eléctrico.

El bloque de la característica voltaje tiempo tiene las siguientes salidas:

- $V_{tabla}$  = característica voltaje tiempo en condiciones ambientales ideales.
- $V_{real}$  = característica voltaje tiempo en condiciones ambientales locales.

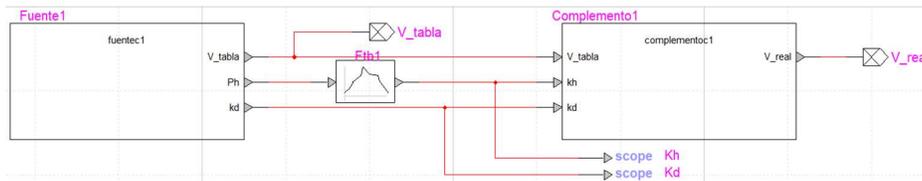
Las entradas y salidas de este modelo son:

- $V_{ref}$  = voltaje aplicado al aislador, terminal eléctrico.
- $S_{in}$  = terminal de entrada del interruptor controlado por voltaje, terminal eléctrico.
- $S_{out}$  = terminal de salida del interruptor controlado por voltaje, terminal eléctrico.
- $Strip$  = señal de control que indica la disrupción completa, salida digital.

Se puede observar que este es el modelo más complejo de todo el modelo, lo cual se justifica al tener en cuenta que este corresponde al comportamiento del aislador.

- **Prueba de disrupción en seco a baja frecuencia.**

En la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia se utiliza un modelo de curva voltaje tiempo, el cual considera el factor de corrección por densidad del aire ( $k_d$ ) y el factor de corrección por humedad ( $k_h$ ). Para la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia el valor del voltaje de disrupción nominal es de 90 kV para el aislador ANSI DS-15.



**Figura 3.3** Modelo de bloque CVt para prueba de disrupción en seco.

Este modelo está compuesto por:

- *Fuente1* = Bloque Simulink DLL en donde se obtiene la curva voltaje tiempo en condiciones ambientales ideales.
- *Complemento1* = Bloque Simulink DLL en donde se realiza la corrección por condiciones ambientales locales y se obtiene la curva voltaje tiempo en condiciones ambientales locales.
- *Ftb1* = Bloque tabla de valores que contiene los valores para obtener el valor del factor de corrección por humedad a partir del valor de la presión de vapor ambiental. Este bloque tiene cargados los valores de la Figura 2.1.

Los bloques *Fuente1* y *Complemento1* de la Figura 3.3, tienen asociado un modelo de Simulink respectivamente, estos se presentan en el **ANEXO IV**.

La característica voltaje tiempo en condiciones ambientales ideales se obtiene a partir de la Ecuación (1.1), por lo cual se han definido los valores de  $A$  y  $B$  para todos los casos de estudio, como se muestra en la Tabla 3.1

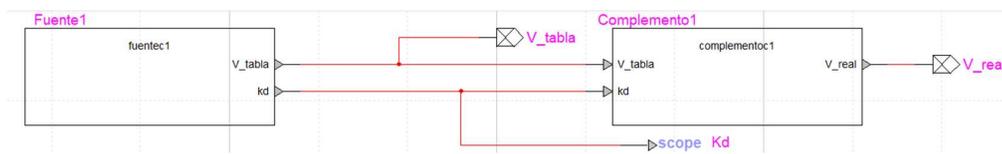
**Tabla 3.1** Valores de  $A$  y  $B$  de la Curva Voltaje Tiempo, usados en la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia.

	A	B
<b>Caso 1</b>	94.2437	-0.0286
<b>Caso 2</b>	115.7175	-0.0907
<b>Caso 3</b>	136.1297	-0.0286
<b>Caso 4</b>	168.3328	-0.1606
<b>Caso 5</b>	116.5381	-0.1606

	A	B
<b>Caso 6</b>	83.7721	-0.0286
<b>Caso 7</b>	139.8856	-0.2404
<b>Caso 8</b>	101.1321	-0.0588
<b>Caso 9</b>	108.8027	-0.0713
<b>Caso 10</b>	90.9548	-0.0170

- **Prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia.**

En la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia se utiliza un modelo de curva voltaje tiempo, el cual considera solamente el factor de corrección por densidad del aire ( $k_d$ ). Se debe considerar que para la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia el valor del voltaje de disrupción nominal es de 65 kV para el aislador ANSI DS-15.



**Figura 3.4** Modelo de Bloque CVt para prueba de disrupción en húmedo.

Este modelo está compuesto por:

- *Fuente1* = Bloque Simulink DLL en donde se obtiene la curva voltaje tiempo en condiciones ambientales ideales.
- *Complemento1* = Bloque Simulink DLL en donde se realiza la corrección por condiciones ambientales locales y se obtiene la curva voltaje tiempo en condiciones ambientales locales.

Los bloques *Fuente1* y *Complemento1* de la Figura 3.4, tienen asociado un modelo de Simulink respectivamente, estos se presentan en el **ANEXO IV**.

La característica voltaje tiempo en condiciones ambientales ideales se obtiene a partir de la Ecuación (1.1), por lo cual se han definido los valores de  $A$  y  $B$  para todos los casos de estudio, como se muestra en la Tabla 3.2.

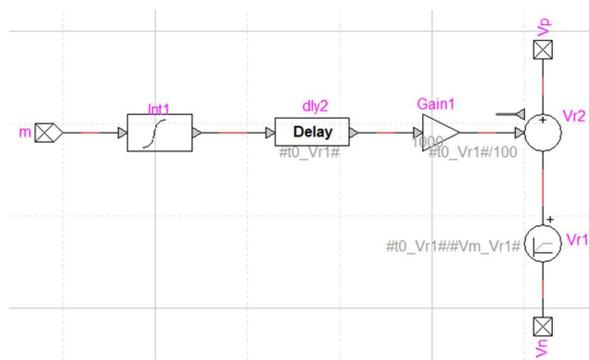
**Tabla 3.2** Valores de *A* y *B* de la Curva Voltaje Tiempo, usados en la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia.

	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Caso 1</b>	71.4521	-0.0588
<b>Caso 2</b>	91.6453	-0.1245
<b>Caso 3</b>	109.9262	-0.0588
<b>Caso 4</b>	129.4868	-0.1606
<b>Caso 5</b>	84.1664	-0.1606

	<b>A</b>	<b>B</b>
<b>Caso 6</b>	60.4594	-0.0588
<b>Caso 7</b>	103.0736	-0.2404
<b>Caso 8</b>	77.5307	-0.0907
<b>Caso 9</b>	85.1178	-0.1040
<b>Caso 10</b>	67.3608	-0.0465

### 3.1.1.2 MODELO DE LA FUENTE DE VOLTAJE

El modelo de la fuente implementado en EMTP-RV para la simulación de las pruebas al aislador ANSI DS-15 comprende el bloque constante *TIV* y el bloque de subgrupo *M\_Fuente* de la Figura 3.1.



**Figura 3.5** Modelo de la Fuente de Prueba implementada en EMTP-RV.

En la Figura 3.5, se muestra el modelo de la fuente de prueba. Los elementos que componen este modelo son:

- *Vr1* = fuente de voltaje tipo rampa lineal que alimenta hasta el 75% del voltaje de disrupción nominal.
- *Vr2* = fuente de voltaje controlada que permite elevar el voltaje desde el 75% del voltaje de disrupción nominal con el uso de una rampa lineal de pendiente variable.
- *Int1* = bloque de integración.
- *Dly2* = bloque de retraso en tiempo.
- *Gain1*= ganancia para convertir la tasa de incremento de voltaje de V/s a kV/s.

Las entradas de este modelo son:

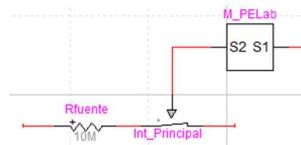
- *Vp* = terminal positivo de la fuente de aplicación de voltaje, terminal eléctrico.

- $V_n$  = terminal negativo de la fuente de aplicación de voltaje, terminal eléctrico.
- $m$  = tasa de incremento de voltaje, entrada digital.

El valor de la tasa de incremento de voltaje se introduce desde el bloque de constante  $TIV$  de la Figura 3.1, este valor se introduce en kV/s.

### 3.1.1.3 MODELO DE LAS CONDICIONES DE LABOTARIO

Las condiciones de laboratorio correspondientes a los equipos de protección del laboratorio de pruebas se muestran en la Figura 3.6.

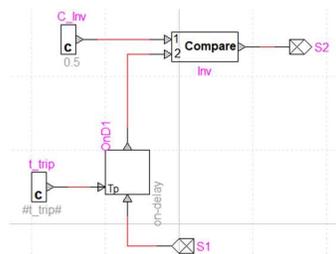


**Figura 3.6** Modelo de los equipos de protección del laboratorio de pruebas implementado en EMTP-RV.

Este modelo tiene como objetivo conectar los modelos del aislador ANSI DS-15 y de la fuente de aplicación de voltaje. Los elementos que componen este modelo son:

- $Rfuente$  = resistencia limitadora de corriente.
- $Int\_Principal$  = interruptor principal de alimentación.
- $M\_PELab$  = modelo para apertura de interruptor principal tras disrupción completa.

En la Figura 3.7, se muestra los elementos que componen el bloque de  $M\_PELab$ .



**Figura 3.7** Modelo del bloque  $M\_PELab$ .

Los elementos que componen el bloque  $M\_PELab$  son:

- $t\_trip$  = tiempo de retraso para apertura del interruptor principal.
- $OnD1$  = bloque de retardo al encendido.
- $Inv$  = bloque comparador configurado como inversor.

- $C_{Inv}$  = bloque de constante usado para configurar el comparador como inversor.

Las entradas del bloque  $M_{PELab}$  son:

- $S1$  = señal que indica la disrupción completa del aislador, entrada digital.
- $S2$  = señal que indica la apertura del interruptor principal, salida digital.

Las condiciones de laboratorio correspondientes a las correcciones por condiciones ambientales se detallan en el modelo del aislador, en la sección 3.1.1.1 y en el **ANEXO IV**.

### 3.1.2 SIMULACIÓN DE PRUEBAS DE AISLADORES

Para la simulación de las pruebas de aisladores se han analizado 10 casos de estudio. En esta sección se analizan los casos más representativos, correspondientes a los casos 1, 3 y 6. El análisis y los detalles de los demás casos de estudio se presentan en el **ANEXO V**.

#### 3.1.2.1 CASO 1: AISLADOR ANSI DS-15 IDEAL.

El caso de estudio 1 presenta un aislador con un comportamiento ideal respecto a las normas ANSI/NEMA C.29.11-2018 y ANSI/NEMA C.29.11-2020.

- **Prueba de disrupción en seco a baja frecuencia**

Los resultados de la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia aplicada al caso de estudio 1, aplicada 5 veces, se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Resultados de prueba de disrupción en seco aplicada al caso de estudio 1.

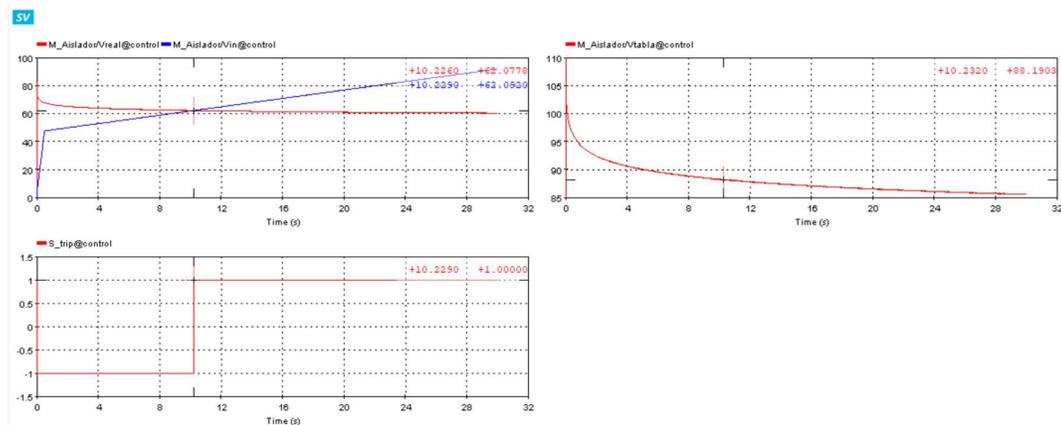
Caso	Prueba No.	Raíz Aleatoria	TIV (kV/s)	$V_{exp}$ (kV)	$V_{real}$ (kV)	$I_{arco}$ (mA)	Tiempo (s)
1	1	158469	1.50	62.084	88.167	6.208	10.2230
	2	383387	1.68	62.266	88.421	6.227	9.2895
	3	217436	1.38	61.973	88.011	6.197	10.9880
	4	9964	1.55	62.135	88.238	6.214	9.9425
	5	974685	1.32	61.901	87.905	6.190	11.4100
$1.3 \leq TIV \leq 1.7$			<b>Promedio</b>	62.07	88.15		

Con los datos obtenidos de la prueba de disrupción en seco se determina que el aislador del caso 1 si cumple con el límite del 95% del valor del voltaje de disrupción nominal. En la Tabla 3.3 se presentan los valores promedio del voltaje de disrupción experimental con un valor de 62.07 kV y real con un valor de 88.15 kV. Al comparar el voltaje de disrupción real con el nominal se obtiene un valor de 97.94%. El cálculo se muestra en la Ecuación (3.1).

$$\frac{V_{real}}{V_{nom}} * 100\% = \frac{88.15 \text{ kV}}{90 \text{ kV}} * 100\% = 97.94\% \quad (3.1)$$

Las formas de onda obtenidas en la prueba de disrupción en seco número 1 del caso de estudio 1 se presentan en las Figura 3.8 y Figura 3.9.

En la Figura 3.8 se muestran las señales digitales que están asociadas al modelo del aislador, las cuales son responsables de que se produzca la disrupción del aislador.



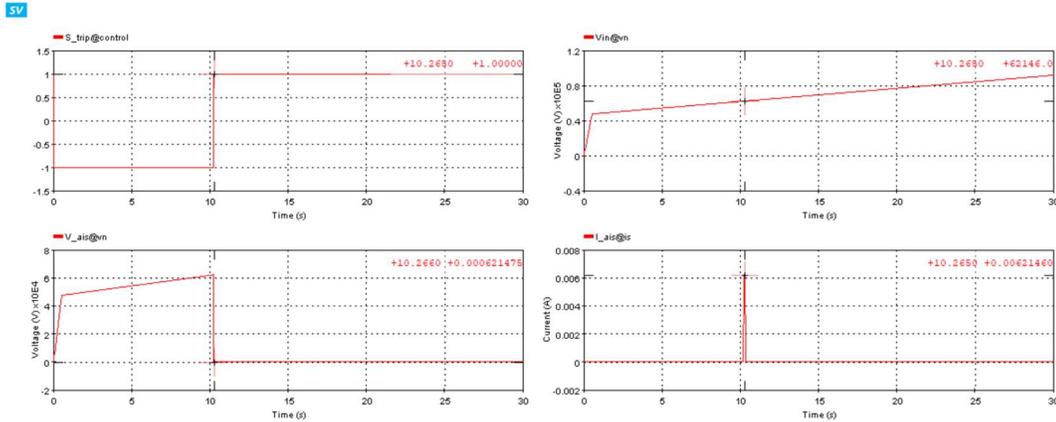
**Figura 3.8** Caso 1 - Característica voltaje tiempo experimental vs voltaje de aplicación, característica voltaje tiempo real y señal para identificar disrupción completa del aislador.

En el cuadro superior izquierdo se muestra el cruce entre el voltaje aplicado al aislador, en color rojo, y la característica voltaje tiempo del aislador, en color azul. De acuerdo con el modelo de aislador planteado, cuando el voltaje aplicado supera a la curva voltaje tiempo se produce la disrupción, y en este caso, como se observa en el cuadro inferior izquierdo se puede verificar que ha existido la disrupción completa del aislador debido al cambio de estado de la señal responsable de indicar la disrupción del aislador.

En el cuadro superior derecho se muestra la característica voltaje tiempo corregida a condiciones ambientales ideales, y al asociar esta curva con el tiempo de disrupción, se puede obtener el valor real de voltaje de disrupción de este caso.

En el cuadro inferior izquierdo se muestra la señal que indica si se ha producido la disrupción completa del aislador, el tiempo mostrado en la Figura 3.8 no coincide con el tiempo de disrupción de la Tabla 3.3, lo cual se debe a que gráficamente no es posible indicar con exactitud el primer instante de la disrupción completa, por lo cual ha sido necesaria la exportación y tabulación de los resultados de simulación de todas las pruebas.

En la Figura 3.9 se muestra el comportamiento de las variables eléctricas que están asociadas al modelo del aislador.



**Figura 3.9** Caso 1 - Señal para identificar disrupción completa del aislador, voltaje proporcionado por la fuente, voltaje sobre el aislador y corriente de arco eléctrico.

En el cuadro superior izquierdo se presentan la señal que indica la disrupción del aislador, en este caso esta señal se utiliza como referencia para los demás cuadros.

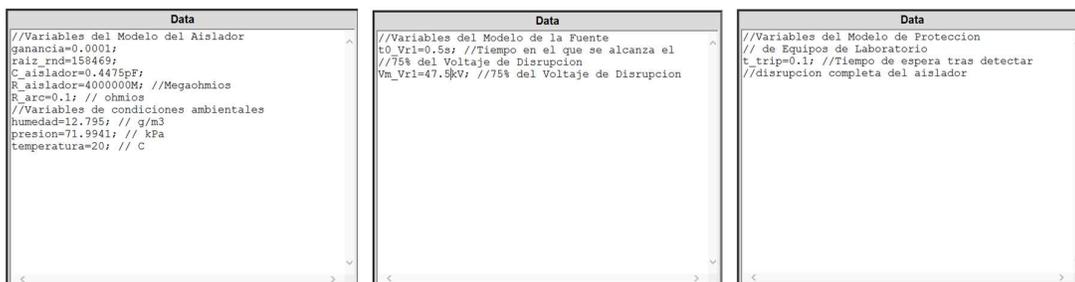
En el cuadro superior derecho se presenta el voltaje proporcionado por el modelo de la fuente, medido directamente de sus terminales.

En el cuadro inferior izquierdo se presenta el voltaje sobre el aislador. Lo más notable es que al momento que se produce la disrupción, el voltaje en los terminales del aislador tiende a cero, debido a que por naturaleza un arco eléctrico se comporta como un corto circuito. Cabe recalcar que antes de la disrupción, el voltaje sobre el aislador tiene la misma forma de onda y los mismos valores que la forma de onda del voltaje de la fuente.

En el cuadro inferior derecho se presenta la corriente medida en serie al aislador. Antes de la disrupción el valor de esta corriente tiende a cero, y esto comprueba el comportamiento que un aislador mantiene separados eléctricamente los elementos puestos a tierra de los elementos sometidos a un nivel de voltaje. Con la disrupción se produce un pico de corriente, el cual está en el orden de los miliamperios debido a la resistencia limitadora de corriente que fue utilizada en el modelo, este pico de corriente tiene una duración de aproximadamente 100 ms, lo cual es resultado de la acción del interruptor principal de la alimentación que actúa al momento de detectar la disrupción completa del aislador.

Las formas de onda de las otras pruebas tienen características similares a las obtenidas en la prueba 1. Una diferencia clave es el tiempo en que se produce la disrupción debido a la incertidumbre tanto en la característica voltaje tiempo como en el voltaje de aplicación.

En la Figura 3.10, se presentan los valores asociados a las variables de cada uno de los modelos que fueron utilizados para el caso de estudio 1, estos valores se muestran en la interfaz de la máscara de cada respectivo modelo.



**Figura 3.10** Declaración de Variables del Caso de Estudio 1. Prueba en seco.

Para todas las pruebas del caso 1 se utilizan los mismos valores en las variables, ya que las 5 pruebas se aplican al mismo aislador, la única diferencia entre pruebas es el valor de la `raiz_rnd`, el cual corresponde a la raíz aleatoria y se muestra en la Tabla 3.3.

Los valores usados para los elementos del aislador se obtuvieron de la referencia bibliografica [16], en donde se realizan pruebas para determinar la capacitancia y resistencia en diferentes condiciones de contaminación al aislador ANSI DS-15.

Los valores usados para las condiciones ambientales se obtuvieron de los datos anuales de la referencia bibliografica [17].

- **Prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia**

Los resultados de la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia aplicada al caso de estudio 1, aplicada 5 veces, se muestran en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Resultados de prueba de disrupción en húmedo aplicada al caso de estudio 1.

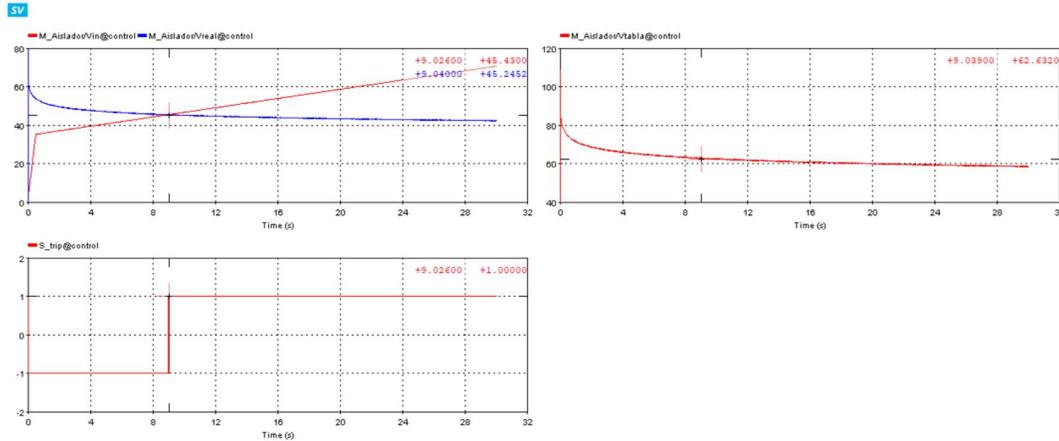
Caso	Prueba No.	Raíz Aleatoria	TIV (kV/s)	V_exp (kV)	V_real (kV)	I_arco (mA)	Tiempo (s)
1	1	880126	1.46	45.885	63.367	4.589	7.8190
	2	645727	1.35	45.665	63.193	4.566	8.25
	3	428827	1.22	45.432	62.765	4.543	8.8870
	4	626714	1.42	45.775	63.249	4.578	7.9480
	5	661396	1.12	45.318	62.564	4.532	9.5340
1.1 ≤ TIV ≤ 1.5			<b>Promedio</b>	45.61	63.03		

Con los datos obtenidos de la prueba de disrupción en húmedo se determina que el aislador del caso 1 si cumple con el límite del 90% del valor del voltaje de disrupción nominal. En la Tabla 3.4 se presentan los valores promedio del voltaje de disrupción experimental con un valor de 45.61 kV y real con un valor de 63.03 kV. Al comparar el voltaje de disrupción real con el nominal se obtiene un valor de 96.97%. El cálculo se muestra en la Ecuación (3.2).

$$\frac{V_{real}}{V_{nom}} * 100\% = \frac{63.03 \text{ kV}}{65 \text{ kV}} * 100\% = 96.97\% \quad (3.2)$$

Las formas de onda obtenidas en la prueba de disrupción en húmedo número 3 del caso de estudio 1 se presentan en las Figura 3.11 y Figura 3.12.

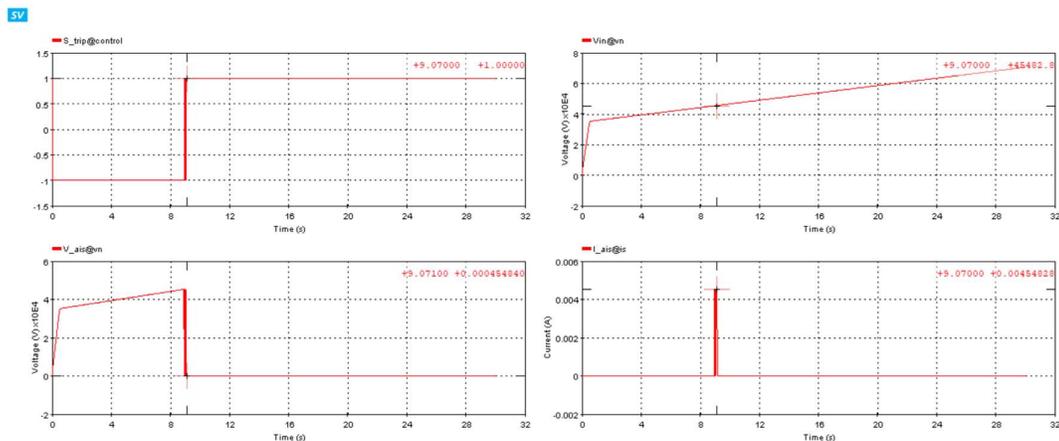
En la Figura 3.11 se muestran las señales asociadas al modelo del aislador, las cuales son responsables de que se produzca la disrupción del aislador.



**Figura 3.11** Caso 1 - Característica voltaje tiempo experimental vs voltaje de aplicación, característica voltaje tiempo real y señal para identificar disrupción completa del aislador.

La disposición de los cuadros en la Figura 3.11 es similar a la disposición de la Figura 3.8, esto debido a que la prueba de disrupción en seco y en húmedo presentan las mismas señales digitales. La principal diferencia se encuentra en la curva voltaje tiempo, en la tasa de incremento de voltaje, y en la magnitud que se afecta a la curva voltaje tiempo por valores aleatorios. Esto como consecuencia de que el voltaje de disrupción nominal es menor en este caso y se maneja una incertidumbre mayor, como indica la norma técnica.

En la Figura 3.12 se muestran las variables eléctricas asociadas al modelo del aislador.



**Figura 3.12** Caso 1 - Señal para identificar disrupción completa del aislador, voltaje proporcionado por la fuente, voltaje sobre el aislador y corriente de arco eléctrico.

De forma similar, la disposición de los cuadros de la Figura 3.12 es la misma que en la Figura 3.9. En este caso la diferencia se da en las magnitudes del voltaje sobre el aislador y corriente de arco eléctrico, ya que ambas tienen un valor inferior en comparación a los valores obtenidos en la prueba de disrupción en seco.

En la Figura 3.13, se presentan los valores asociados a las variables de cada uno de los modelos que fueron utilizados para el caso de estudio 1.

```

//Variables del Modelo del Aislador
ganancia=0.001;
raiz_rnd=428827;
C_aislador=0.4475pF;
R_aislador=1000000M; //Megaohmios
R_arco=0.1; // ohmios
//Variables de Condiciones Ambientales
presion=71.9941; // kPa
temperatura=20; // C

//Variables del Modelo de la Fuente
t0_Vr1=0.5s; //Tiempo en el que se alcanza el
//75% del Voltaje de Disrupcion
Vm_Vr1=35.2kV; //75% del Voltaje de Disrupcion

//Variables del Modelo de Proteccion
//de Equipos de Laboratorio
t_trip=0.1; //Tiempo de espera tras detectar
//disrupcion completa del aislado

```

**Figura 3.13** Declaración de Variables del Caso de Estudio 1. Prueba en húmedo.

Al considerar que la precipitación de la prueba de disrupción en húmedo es interpretada como un tipo de contaminación, se ha tenido en cuenta la disminución del valor de la resistencia del aislador en estado estacionario. El valor de la capacitancia del aislador no es afectado por las condiciones de contaminación a las que el aislador está sometido. El valor de la humedad absoluta no es necesario en la prueba de disrupción en húmedo.

Los valores utilizados en el modelo del aislador y para las condiciones ambientales se han obtenido de las fuentes bibliográficas ya mencionadas [16], [17].

### 3.1.2.2 CASO 3: AISLADOR ANSI DS-15 SOBREDIMENSIONADO.

En este caso de estudio se ha considerado un aislador cuyo voltaje de disrupción es mayor al voltaje de disrupción del aislador ANSI DS-15, para lo cual, se ha ajustado la curva voltaje tiempo de modo que en la simulación el valor del voltaje de disrupción sea mayor a 90 kV.

- **Prueba de disrupción en seco a baja frecuencia**

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados de prueba de disrupción en seco aplicada 5 veces al aislador del caso de estudio 3.

**Tabla 3.5** Resultados de prueba de disrupción en seco aplicada al caso de estudio 3.

Caso	Prueba No.	Raíz Aleatoria	Pendiente (kV/s)	V_exp (kV)	V_real (kV)	I_arco (mA)	Tiempo (s)
3	1	316973	1.57	87.347	124.021	8.735	25.8805
	2	593368	2.10	88.008	124.985	8.801	19.7900
	3	463626	1.87	87.737	124.605	8.774	22.0175
	4	183412	2.00	87.897	124.807	8.790	20.6990
	5	288272	2.20	88.127	125.108	8.813	18.9675
1.8 ≤ TIV ≤ 2.2			<b>Promedio</b>	87.82	124.71		

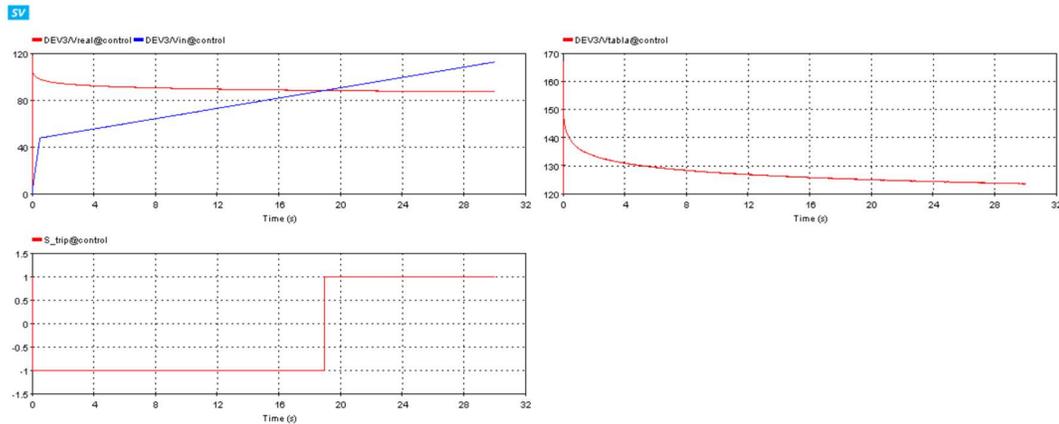
Con los resultados de la prueba de disrupción en seco se determina que el aislador del caso 3 si cumple con el límite del 95% del valor del voltaje de disrupción nominal. En la Tabla 3.5 se muestran los valores promedio del voltaje de disrupción experimental con un valor de 87.82 kV y real con un valor de 124.71 kV. Al comparar el voltaje de disrupción real con el nominal se obtiene un valor de 131.27%, como se muestra en la Ecuación (3.3).

$$\frac{V_{real}}{V_{nom}} * 100\% = \frac{124.71 \text{ kV}}{90 \text{ kV}} * 100\% = 131.27\% \quad (3.3)$$

En la primera prueba aplicada se puede observar que el tiempo de disrupción está cerca del límite de 30 segundos, por lo cual, para pruebas posteriores se incrementa el valor base de la tasa de incremento de voltaje (*TIV*) de 1.5 a 2.0 kV/s.

Las formas de onda obtenidas en la prueba de disrupción en seco número 5 del caso de estudio 3 se presentan en las Figura 3.14 y Figura 3.15.

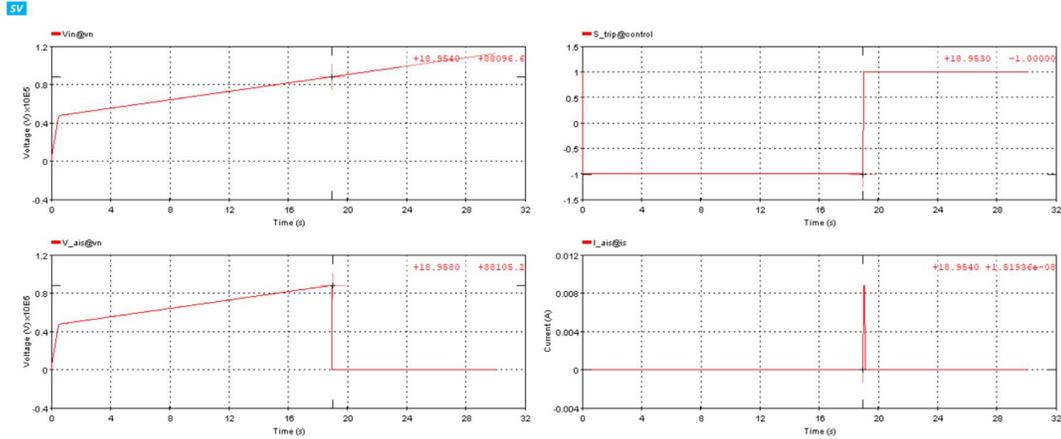
En la Figura 3.14 se muestran las señales digitales asociadas al modelo del aislador, las cuales son responsables de que se produzca la disrupción del aislador.



**Figura 3.14** Caso 3 - Característica voltaje tiempo experimental vs voltaje de aplicación, característica voltaje tiempo real y señal para identificar disrupción completa del aislador.

La disposición de los cuadros en la Figura 3.14 es similar a la disposición de la Figura 3.8. En este caso es destacable que el tiempo de disrupción esta alrededor de 20 segundos con la modificación de la tasa de incremento de voltaje, lo cual es un tiempo largo para la disrupción, por lo cual se podría aumentar aún más dicho valor. Así mismo, en la curva voltaje tiempo real se observa que el voltaje de disrupción esta alrededor de 130 kV, el cual supera notablemente al valor nominal de 90 kV.

En la Figura 3.15 se muestran las variables eléctricas asociadas al modelo del aislador.



**Figura 3.15** Caso 3 - Señal para identificar disrupción completa del aislador, voltaje proporcionado por la fuente, voltaje sobre el aislador y corriente de arco eléctrico.

La disposición de los cuadros de la Figura 3.15 es la misma que en la Figura 3.9. Se debe destacar la alta pendiente del voltaje de aplicación debido a la tasa de incremento de voltaje usada, y la corriente de arco eléctrico tiene un valor superior al obtenido en el caso 1.

En la Figura 3.16, se presentan los valores asociados a las variables de cada uno de los modelos que fueron utilizados para el caso de estudio 3.

```

//Variables del Modelo del Aislador
ganancia=0.0001;
raiz_rnd=288272;
C_aislador=0.4475pF;
R_aislador=6200000M; //Megaohmios
//Variables de condiciones ambientales
R_arc=0.1 // ohmios
humedad=12.795; // g/m3
presion=71.9941; // kPa
temperatura=20; // C

```

```

//Variables del Modelo de la Fuente
t0_Vr1=0.5s; // Tiempo en el que se alcanza el
// 75% del Voltaje de Disrupcion
Vm_Vr1=47.5kV; // 75% del voltaje del disrupcion

```

```

//Variables del Modelo de Proteccion
// de Equipos de Laboratorio
t_trip=0.1; //Tiempo de espera tras detectar
//disrupcion completa del aislador

```

**Figura 3.16** Declaración de Variables del Caso de Estudio 3. Prueba en seco.

Teniendo en cuenta el aumento en el voltaje de disrupción se ha decidido aumentar el valor de la resistencia del aislador, debido a que ambos valores se asocian a la rigidez dieléctrica.

Los valores usados en el modelo del aislador y en las condiciones ambientales se han obtenido de las fuentes bibliográficas [16], [17].

- **Prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia**

En la Tabla 3.6 se presentan los resultados de prueba de disrupción en húmedo aplicada 5 veces al aislador del caso de estudio 3.

**Tabla 3.6** Resultados de prueba de disrupción en húmedo aplicada al caso de estudio 3.

Caso	Prueba No.	Raíz Aleatoria	Pendiente (kV/s)	V_exp (kV)	V_real (kV)	I_arco (mA)	Tiempo (s)
3	1	595851	2.09	67.569	93.362	6.757	15.9880
	2	177854	1.98	67.360	93.223	6.736	16.7430
	3	356802	1.88	67.167	92.739	6.717	17.5040

	4	492101	2.11	67.655	93.287	6.765	15.8820
	5	610942	1.89	67.208	92.890	6.721	17.4360
	1.8 ≤ TIV ≤ 2.2		<b>Promedio</b>	67.39	93.10		

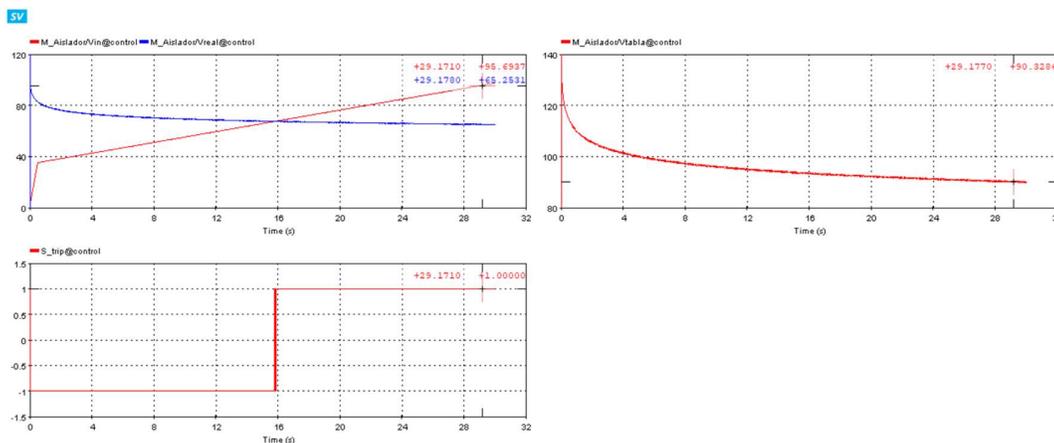
A partir de los resultados de la prueba de disrupción en húmedo se determina que el aislador del caso 3 si cumple con el límite del 90% del valor del voltaje de disrupción nominal. En la Tabla 3.6 se muestran los valores promedio del voltaje de disrupción experimental con un valor de 67.39 kV y real con un valor de 93.10 kV. Al comparar el voltaje de disrupción real con el nominal se obtiene un valor de 143.23%, Ecuación (3.4).

$$\frac{V_{real}}{V_{nom}} * 100\% = \frac{93.1 \text{ kV}}{65 \text{ kV}} * 100\% = 143.23\% \quad (3.4)$$

Al tener en cuenta que la tasa de incremento de voltaje ( $TIV$ ) en la prueba en seco fue aumentada a un valor de 2.0 kV/s, en esta prueba también se consideró el mismo valor.

Las formas de onda obtenidas en la prueba de disrupción en húmedo número 4 del caso de estudio 3 se presentan en las Figura 3.17 y Figura 3.18.

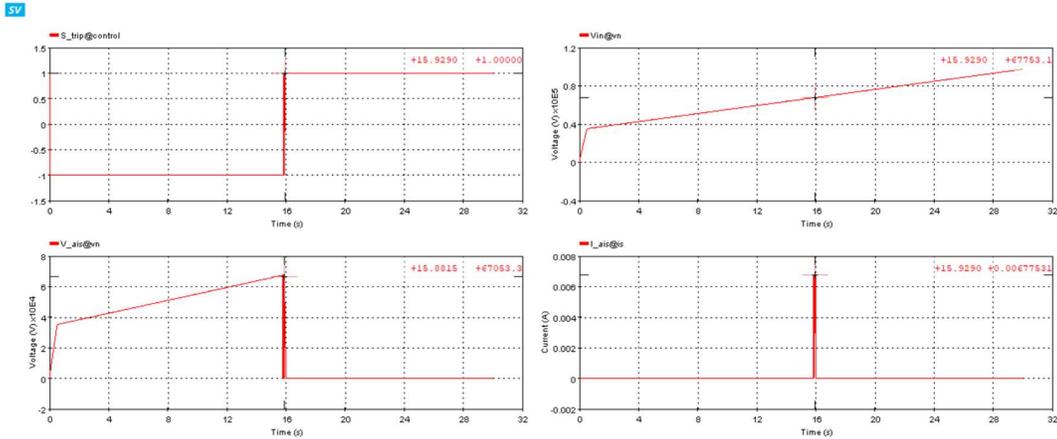
En la Figura 3.17 se muestran las señales digitales asociadas al modelo del aislador, las cuales son responsables de que se produzca la disrupción del aislador.



**Figura 3.17** Caso 3 - Característica voltaje tiempo experimental vs voltaje de aplicación, característica voltaje tiempo real y señal para identificar disrupción completa del aislador.

La disposición de los cuadros en la Figura 3.17 es similar a la disposición de la Figura 3.8. En la curva voltaje tiempo real se observa que el voltaje de disrupción esta alrededor de 90 kV, el cual supera al valor nominal de 65 kV.

En la Figura 3.18 se muestran las variables eléctricas asociadas al modelo del aislador.



**Figura 3.18** Caso 3 - Señal para identificar disrupción completa del aislador, voltaje proporcionado por la fuente, voltaje sobre el aislador y corriente de arco eléctrico.

La Figura 3.18 y Figura 3.9 usan la misma disposición de cuadros. La pendiente del voltaje de aplicación y la corriente de arco eléctrico tienen el mismo comportamiento de la prueba en seco debido al uso de la misma tasa de incremento de voltaje.

Data	Data	Data
<pre>//Variables del Modelo del Aislador ganancia=0.001; tau1z_rnd=492101; C_aislador=0.4475pF; R_aislador=1400000M; //Megaohmios R_arco=0.1; // ohmios //Variables de condiciones ambientales presion=71.9941; // kPa temperatura=20; // C</pre>	<pre>//Variables del Modelo de la Fuente t0_Vr1=0.5s; // Tiempo en el que se alcanza el // 75% del Voltaje de Disrupcion Vm_Vr1=35.2kV; // 75% del voltaje de disrupcion</pre>	<pre>//Variables del Modelo de Proteccion // de Equipos de Laboratorio t_trip=0.1; //Tiempo de espera tras detectar //disrupcion completa del aislador</pre>

**Figura 3.19** Declaración de Variables del Caso de Estudio 3. Prueba en húmedo.

En la Figura 3.19, se presentan los valores asociados a las variables de cada uno de los modelos que fueron utilizados para el caso de estudio 3. En la prueba en húmedo de este caso de estudio también se ha considerado un aumento en la resistencia de aislador debido al aumento en el voltaje de disrupción.

Los valores usados en el modelo del aislador y en las condiciones ambientales se han obtenido de las fuentes bibliográficas [16], [17].

### 3.1.2.2 CASO 6: AISLADOR ANSI DS-15 SUBDIMENSIONADO.

Este caso de estudio utiliza una curva voltaje tiempo en la que se espera que el voltaje de disrupción del aislador sea menor al valor del voltaje de disrupción nominal.

- **Prueba de disrupción en seco a baja frecuencia**

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados de prueba de disrupción en seco aplicada 5 veces al aislador del caso de estudio 6.

**Tabla 3.7** Resultados de prueba de disrupción en seco aplicada al caso de estudio 6

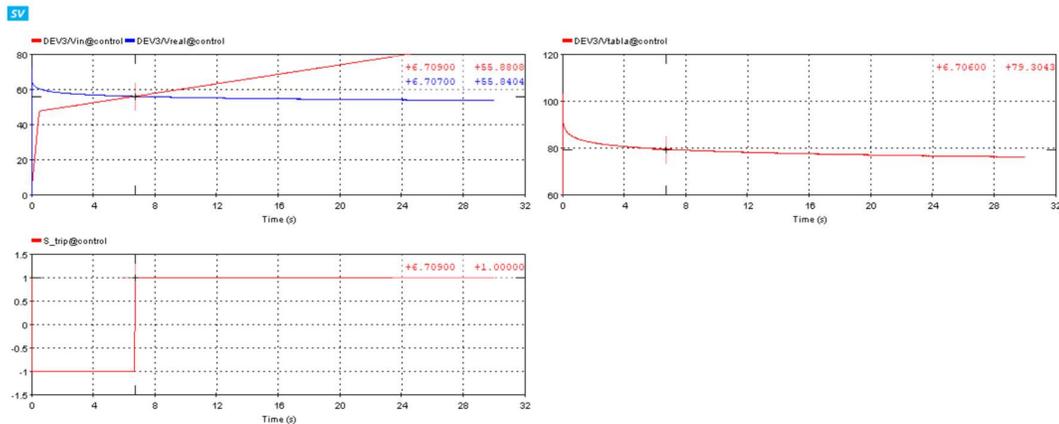
Caso	Prueba No.	Raíz Aleatoria	Pendiente (kV/s)	V_exp (kV)	V_real (kV)	I_arco (mA)	Tiempo (s)
6	1	682478	1.38	55.896	79.370	5.590	6.5845
	2	234551	1.67	56.131	79.713	5.613	5.6690
	3	908071	1.38	55.893	79.378	5.589	6.5825
	4	825499	1.60	56.081	79.633	5.608	5.8635
	5	573134	1.35	55.867	79.330	5.587	6.6980
1.3 ≤ TIV ≤ 1.7			<b>Promedio</b>	55.97	79.48		

Con los resultados de la prueba de disrupción en seco se determina que el aislador del caso 6 no cumple con el límite del 95% del valor del voltaje de disrupción nominal. En la Tabla 3.7 se muestran los valores promedio del voltaje de disrupción experimental con un valor de 55.97 kV y real con un valor de 79.48 kV. Al comparar el voltaje de disrupción real con el nominal se obtiene un valor de 88.31%, como se muestra en la Ecuación (3.4).

$$\frac{V_{real}}{V_{nom}} * 100\% = \frac{79.48 \text{ kV}}{90 \text{ kV}} * 100\% = 88.31\% \quad (3.4)$$

Las formas de onda obtenidas en la prueba de disrupción en seco número 5 del caso de estudio 6 se presentan en las Figura 3.20 y Figura 3.21.

En la Figura 3.20 se muestran las señales digitales asociadas al modelo del aislador, las cuales son responsables de que se produzca la disrupción del aislador.

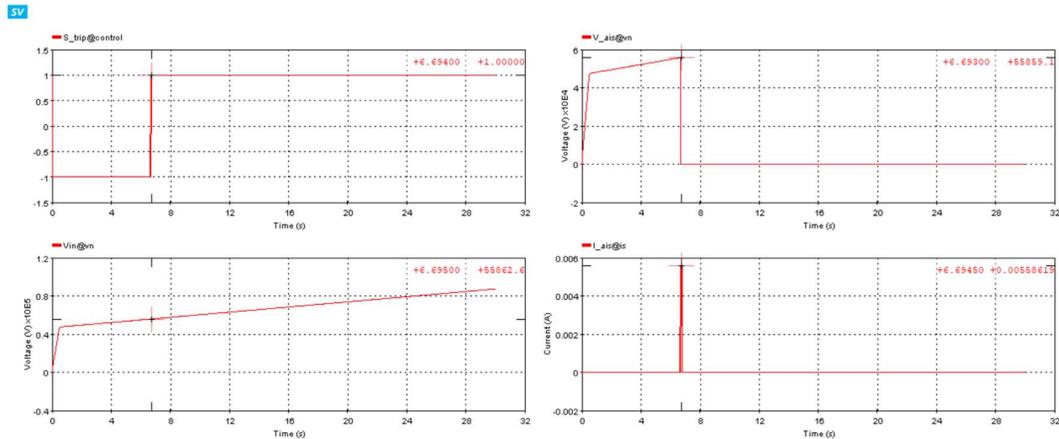


**Figura 3.20** Caso 6 - Característica voltaje tiempo experimental vs voltaje de aplicación, característica voltaje tiempo real y señal para identificar disrupción completa del aislador.

La disposición de los cuadros en la Figura 3.20 es similar a la disposición de la Figura 3.8. En este caso el tiempo de disrupción tiene un valor aproximado de 6 segundos, valor cercano al límite de 5 segundos. En este caso una opción sería reducir el valor base de la

tasa de incremento de voltaje. En la curva voltaje tiempo real se observa que el voltaje de disrupción esta alrededor de 80 kV, el cual es un valor menor al valor nominal de 90 kV

En la Figura 3.21 se muestran las variables eléctricas asociadas al modelo del aislador.



**Figura 3.21** Caso 6 - Señal para identificar disrupción completa del aislador, voltaje proporcionado por la fuente, voltaje sobre el aislador y corriente de arco eléctrico.

La Figura 3.21 y Figura 3.9 comparten una disposición de cuadros similar. Al usar la tasa de incremento de voltaje de 1.5 kV/s la corriente de arco tiene un valor bajo.

En la Figura 3.22, se presentan los valores de las variables de los modelos utilizados en el caso de estudio 3.

```

//Variables del Modelo del Aislador
ganancia=0.0001;
raiz_rnd=57313;
C_aislador=0.4475pF;
R_aislador=4000000M; //Megaohms
R_arc=0.1; // ohms
//Variables de condiciones ambientales
humedad=12.795; // g/m3
presion=71.9941; // kPa
temperatura=20; // c

//Variables del Modelo de Proteccion
// de Equipos de Laboratorio
t_trip=0.1; //Tiempo de espera tras detectar
//disrupcion completa del aislador

//Variables del Modelo de la Fuente
t0_Vr1=0.5s; // Tiempo en el que se alcanza el
// 75% del Voltaje de Disrupcion
Vm_Vr1=47.5kV; // 75% del voltaje del disrupcion
    
```

**Figura 3.22** Declaración de Variables del Caso de Estudio 6. Prueba en seco.

Los valores usados en el modelo del aislador y en las condiciones ambientales se han obtenido de las fuentes bibliográficas [16], [17].

- **Prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia**

Los resultados de la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia aplicada 6 veces al aislador del caso de estudio 6 se presentan en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8** Resultados de prueba de disrupción en húmedo aplicada al caso de estudio 6.

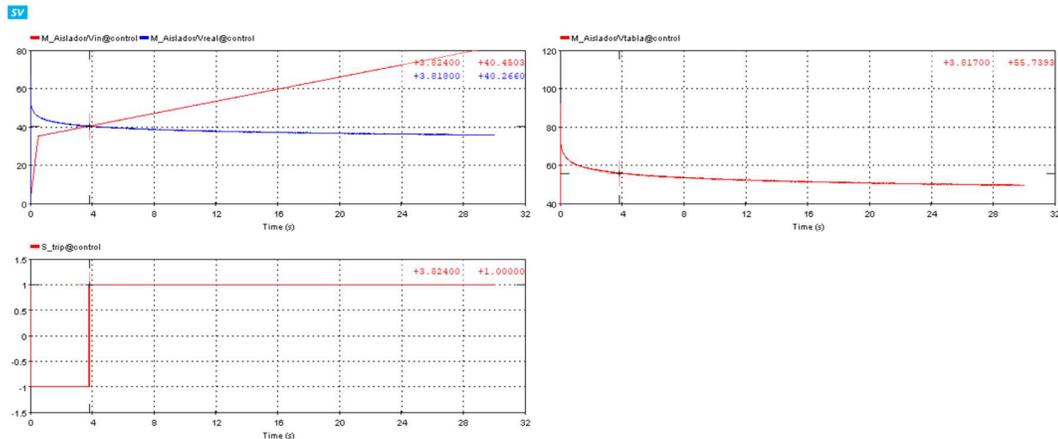
Caso	Prueba No.	Raíz Aleatoria	Pendiente (kV/s)	V_exp (kV)	V_real (kV)	I_arco (mA)	Tiempo (s)
6	1	332908	1.58	40.423	55.839	4.042	3.8060
	2	911698	0.64	39.128	54.008	3.913	6.6385

	3	566739	0.77	39.377	54.445	3.938	5.9250
	4	581734	0.74	39.338	54.377	3.934	6.0920
	5	597473	0.70	39.266	54.203	3.927	6.3090
	6	802787	0.89	39.601	54.764	3.960	5.4460
0.6 ≤ TIV ≤ 1.0			<b>Promedio</b>	39.34	54.57		

De los resultados de la prueba de disrupción en húmedo se determina que el aislador del caso 6 no cumple con el límite del 90% del valor del voltaje de disrupción nominal. En la Tabla 3.8 se presentan los valores promedio del voltaje de disrupción experimental con un valor de 39.34 kV y real con un valor de 54.57 kV. Al comparar el voltaje de disrupción real con el nominal se obtiene un valor de 83.95%. El cálculo se presenta en la Ecuación (3.2).

$$\frac{V_{real}}{V_{nom}} * 100\% = \frac{54.57 \text{ kV}}{65 \text{ kV}} * 100\% = 83.95\% \quad (3.2)$$

En la Figura 3.23 se muestran los resultados de la prueba 1, en la cual el tiempo de disrupción es menor al límite de 5 segundos establecido por la norma. Esta prueba no fue tomada en cuenta para el cálculo del voltaje de disrupción real, por lo cual el valor base de la tasa de incremento de voltaje se redujo a 0.8 kV/s en pruebas posteriores.

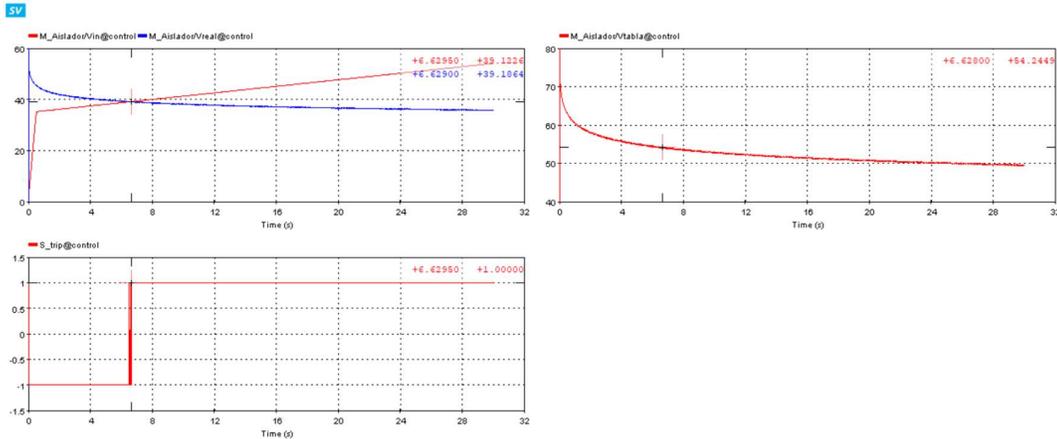


**Figura 3.23** Caso 6 – Prueba en Húmedo 1 - Fallida

Las formas de onda obtenidas en la prueba de disrupción en húmedo número 2 del caso de estudio 6 se presentan en las Figura 3.24 y Figura 3.25.

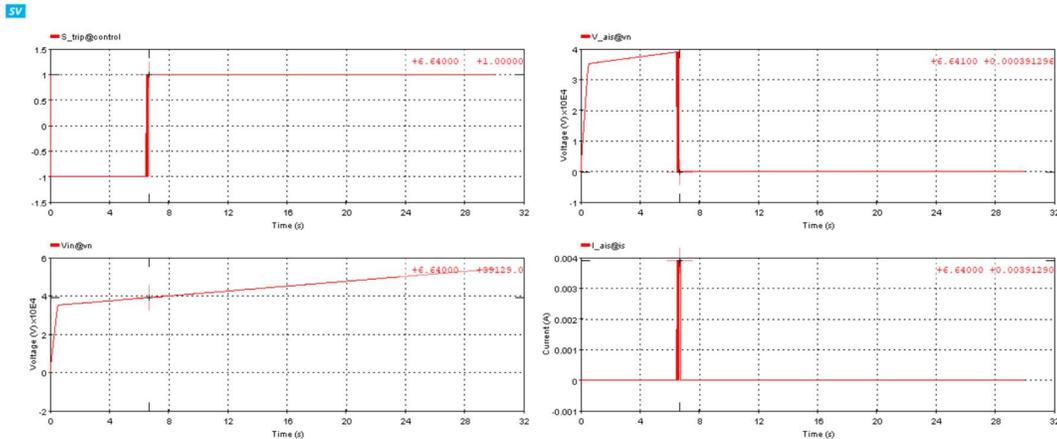
En la Figura 3.24 se muestran las señales digitales asociadas al modelo del aislador, las cuales son responsables de que se produzca la disrupción del aislador.

La Figura 3.24 y Figura 3.8 usan la misma disposición de cuadros. Luego de reducir la tasa de incremento de voltaje, el tiempo de disrupción sigue cercano al límite de 5 segundos, esto indica que se puede reducir aún más dicho valor. En la curva voltaje tiempo real el voltaje de disrupción está alrededor de 50 kV, lo cual es menor al valor nominal de 65 kV.



**Figura 3.24** Caso 6 - Característica voltaje tiempo experimental vs voltaje de aplicación, característica voltaje tiempo real y señal para identificar disrupción completa del aislador.

En la Figura 3.25 se muestran las variables eléctricas asociadas al modelo del aislador.



**Figura 3.25** Caso 6 - Señal para identificar disrupción completa del aislador, voltaje proporcionado por la fuente, voltaje sobre el aislador y corriente de arco eléctrico.

La Figura 3.25 y Figura 3.9 usan la misma disposición de cuadros. El uso de la tasa de incremento de voltaje de 0.8 kV/s, la corriente de arco y el voltaje de disrupción es baja en comparación al valor del caso 1.

En la Figura 3.26, se presentan los valores de las variables de los modelos utilizados en el caso de estudio 6.

Data	Data	Data
<pre>//Variables del Modelo del Aislador ganancia=0.001; raiz_rnd=911699; C_aislador=0.4475pF; R_aislador=4000000M; //Megaohmios R_arc=0.1; // ohmios //Variables de condiciones ambientales presion=71.9941; // kPa temperatura=20; // C</pre>	<pre>//Variables del Modelo de la Fuente t0_Vr1=0.5s; // Tiempo en el que se alcanza el // 75% del Voltaje de Disrupcion Vm_Vr1=35.2kV; // 75% del voltaje de disrupcion</pre>	<pre>//Variables del Modelo de Protección // de Equipos de Laboratorio t_trip=0.1; //Tiempo de espera tras detectar //disrupcion completa del aislador</pre>

**Figura 3.26** Declaración de Variables del Caso de Estudio 6. Prueba en húmedo.

Los valores usados en la Figura 3.26 se obtuvieron de las fuentes bibliograficas [16], [17].

### 3.1.3 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 3.9 y Tabla 3.10 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en todos los casos de estudio para las pruebas de disrupción en seco y en húmedo a baja frecuencia.

Se presenta el rango en que fue aplicada la tasa de incremento de voltaje, el voltaje de disrupción experimental, el voltaje de disrupción real y el voltaje de disrupción nominal. Se incluye el porcentaje de la razón entre el voltaje de disrupción real y nominal, y el cumplimiento del límite, que en la prueba en seco es 95% y en húmedo es 90%.

**Tabla 3.9** Resumen de resultados de prueba de disrupción en seco a baja frecuencia.

Caso	TIV (kV/S)	V <sub>exp</sub> (kV)	V <sub>real</sub> (kV)	V <sub>nom</sub> (kV)	(%)	¿Cumple la norma?
1	1.3 ≤ TIV ≤ 1.7	62.07	88.15	90	97.94	Si
2	1.3 ≤ TIV ≤ 1.7	64.94	92.21	90	102.45	Si
3	1.8 ≤ TIV ≤ 2.2	87.82	124.71	90	138.56	Si
4	1.6 ≤ TIV ≤ 2.0	75.31	106.93	90	118.82	Si
5	1.3 ≤ TIV ≤ 1.7	58.62	83.24	90	92.49	No
6	1.3 ≤ TIV ≤ 1.7	55.97	79.48	90	88.32	No
7	0.25 ≤ TIV ≤ 2.25	57.35	81.44	90	90.49	No
8	TIV = 1.80	62.63	88.93	90	98.81	Si
9	1.2 ≤ TIV ≤ 1.8	64.39	91.42	90	101.58	Si
10	1.2 ≤ TIV ≤ 1.8	61.58	87.44	90	97.16	Si

**Tabla 3.10** Resumen de resultados de prueba de disrupción en seco a baja frecuencia.

Caso	TIV (kV/S)	V <sub>exp</sub> (kV)	V <sub>real</sub> (kV)	V <sub>nom</sub> (kV)	(%)	¿Cumple la norma?
1	1.1 ≤ TIV ≤ 1.5	45.61	63.03	65	96.97	Si
2	1.3 ≤ TIV ≤ 1.7	49.58	68.54	65	105.44	Si
3	1.8 ≤ TIV ≤ 2.2	67.39	93.10	65	143.23	Si
4	1.6 ≤ TIV ≤ 2.0	60.65	83.78	65	128.89	Si
5	1.1 ≤ TIV ≤ 1.5	44.10	60.90	65	93.69	Si
6	0.6 ≤ TIV ≤ 1.0	39.34	54.57	65	83.96	No
7	0.1 ≤ TIV ≤ 1.3	41.68	57.60	65	88.61	No
8	TIV = 1.00	45.30	62.58	65	96.27	Si
9	1.1 ≤ TIV ≤ 1.5	48.21	66.70	65	102.61	Si
10	1.1 ≤ TIV ≤ 1.5	44.41	61.36	65	94.41	Si

Tras el análisis de los 10 casos de estudio, los casos 6 y 7 no cumplen ambas pruebas, y el caso 5 no cumple con el límite de la prueba en seco. Estos 3 casos poseen aisladores que no pueden ser designados para el nivel del voltaje del aislador ANSI DS-15.

### 3.1.3.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO COMPLEMENTARIO

- **Intervalo de Confianza**

En la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 se presenta los extremos del intervalo de confianza obtenidos para las pruebas de disrupción en seco y en húmedo a baja frecuencia aplicada a todos los casos de estudio. El valor de  $T_{\alpha/2}$  es de 2.7765 para la prueba en seco y de 2.3896 para la prueba en húmedo. Este valor se ha obtenido de las tablas de la distribución t de Student considerando los niveles de confianza de 5% y 8% respectivamente.

**Tabla 3.11** Intervalo de Confianza para Resultados de Prueba de Disrupción en Seco.

Caso	V <sub>real</sub> (kV)	Desv. Est. $\sigma$	$\bar{X} - T_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	$\bar{X} + T_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
1	88.15	0.179	87.93	88.37
2	92.21	0.517	91.56	92.85
3	124.71	0.382	124.23	125.18
4	106.93	1.481	105.10	108.77
5	83.24	0.574	82.53	83.96
6	79.48	0.157	79.29	79.68
7	81.44	5.370	74.77	88.11
8	88.93	0.006	88.92	88.94
9	91.42	0.402	90.92	91.92
10	87.44	0.083	87.34	87.54

**Tabla 3.12** Intervalo de Confianza para Resultados de Prueba de Disrupción en Húmedo.

Caso	V <sub>real</sub> (kV)	Desv. Est. $\sigma$	$\bar{X} - T_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	$\bar{X} + T_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$
1	63.03	0.308	62.70	63.36
2	68.54	0.191	68.33	68.74
3	93.10	0.242	92.84	93.36
4	83.78	0.498	83.25	84.31
5	60.90	0.428	60.44	61.35
6	54.57	0.332	54.22	54.93
7	57.60	3.943	53.38	61.81
8	62.58	0.074	62.50	62.66
9	66.70	0.428	66.24	67.16
10	61.36	0.038	61.32	61.40

Con la obtención del intervalo de confianza para cada prueba dentro de cada caso de estudio se consigue caracterizar al aislador usando los datos de la simulación del sistema de estudio. La interpretación del intervalo de confianza aplicado a este estudio consiste en el intervalo en el que se encuentra el valor del voltaje de disrupción real de un aislador.

- **Prueba de Hipótesis**

En la Tabla 3.13 y Tabla 3.14 se presentan los resultados de la aplicación de la prueba de hipótesis a los resultados de la simulación de los casos de estudio. La hipótesis nula y alternativa se han planteado teniendo en cuenta los lineamientos de la norma técnica.

**Tabla 3.13** Prueba de Hipótesis aplicada a Resultados de Prueba de Disrupción en Seco.

Caso	V_real (kV)	Desv. Est. $\sigma$	H0	H1	t_exp	t_tabla	Conclusión
1	88.15	0.179	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	33.07	-2.1318	Se Acepta H0
2	92.21	0.517	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	64.83	-2.1318	Se Acepta H0
3	124.71	0.382	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	513.33	-2.1318	Se Acepta H0
4	106.93	1.481	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	72.35	-2.1318	Se Acepta H0
5	83.24	0.574	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	-19.66	-2.1318	Se Acepta H1
6	79.48	0.157	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	-192.14	-2.1318	Se Acepta H1
7	81.44	5.370	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	-3.78	-2.1318	Se Acepta H1
8	88.93	0.006	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	2810.79	-2.1318	Se Acepta H0
9	91.42	0.402	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	73.75	-2.1318	Se Acepta H0
10	87.44	0.083	$u \geq 90*0.95$	$u < 90*0.95$	117.11	-2.1318	Se Acepta H0

**Tabla 3.14** Prueba de Hipótesis sobre Resultados de Prueba de Disrupción en Húmedo.

Caso	V_real (kV)	Desv. Est. $\sigma$	H0	H1	t_exp	t_tabla	Conclusión
1	63.03	0.308	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	32.83	-1.7726	Se acepta H0
2	68.54	0.191	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	117.72	-1.7726	Se acepta H0
3	93.10	0.242	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	319.57	-1.7726	Se acepta H0
4	83.78	0.498	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	113.46	-1.7726	Se acepta H0
5	60.90	0.428	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	12.52	-1.7726	Se acepta H0
6	54.57	0.332	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	-26.46	-1.7726	Se acepta H1
7	57.60	3.943	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	-0.51	-1.7726	Se acepta H0
8	62.58	0.074	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	123.06	-1.7726	Se acepta H0
9	66.70	0.428	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	42.79	-1.7726	Se acepta H0
10	61.36	0.038	$u \geq 65*0.9$	$u < 65*0.9$	166.98	-1.7726	Se acepta H0

Al comparar los resultados obtenidos de la prueba de hipótesis, con los resultados originales obtenidos de la simulación, se corrobora que los casos de estudio 5, 6 y 7 no cumplen con los límites establecidos por la norma técnica, y esto principalmente resulta en corroborar que el modelo de aislador implementado en el sistema de estudio si permite modelar un aislador real, considerando así la existencia de aisladores que pueden o no cumplir con las características indicadas por la norma ANSI/NEMA C.29.13-2018.

## 3.2 CONCLUSIONES

- Se ha implementado el modelo de un aislador polimérico de suspensión para 15 kV, ANSI DS-15, haciendo uso de un modelo en estado estacionario y un modelo dinámico que utiliza la característica voltaje – tiempo del aislador, específicamente para la simulación de la disrupción del aislador, en el software EMTP-RV.
- El modelo de aislador ANSI DS-15 obtenido permite el ingreso por el usuario de la característica voltaje – tiempo, los parámetros eléctricos del aislador, como son resistencia y capacitancia en estado estacionario, las condiciones ambientales, el voltaje de disrupción nominal, tiempo de coordinación y tiempo de accionamiento del interruptor principal.
- Los resultados de la simulación de las pruebas en el sistema de estudio son el voltaje de disrupción experimental y real del aislador, curvas voltaje tiempo real y experimental, voltaje de la fuente, el tiempo de disrupción, el voltaje en terminales del aislador y la corriente de a través del aislador.
- El sistema de estudio construido en el software EMTP-RV considera las características técnicas de la norma ANSI/NEMA C.29.13-2018, como son el voltaje de disrupción nominal en seco y en húmedo, y los procedimientos de la norma ANSI/NEMA C.29.11-2020, en lo que respecta a aplicación de voltaje, corrección por condiciones ambientales y obtención del voltaje de disrupción experimental.
- Los parámetros de tasa de incremento de voltaje y tiempo de apertura del interruptor principal del sistema de estudio son condiciones de laboratorio que son directamente controladas por el operador que realiza las pruebas, por lo cual estas fueron modeladas considerando que se tenga un control directo de las mismas desde la interfaz de EMTP-RV.
- La simulación de la prueba de disrupción en seco a baja frecuencia y la prueba de disrupción en húmedo a baja frecuencia se ha realizado en el entorno del software EMTP-RV haciendo uso del sistema de estudio conformado por el modelo del aislador y las condiciones de prueba como son el modelo de la fuente de aplicación de voltaje y las condiciones de laboratorio, que contemplan las condiciones ambientales y los equipos de protección del laboratorio de prueba de aisladores.
- La simulación de cada prueba que se realizó fue tratada como un evento independiente de las demás pruebas, lo cual se debe a que cada una de las 5

pruebas aplicadas tiene asociado un valor propio de raíz aleatoria y de tasa de incremento de voltaje. Esta implementación permite la repetición de resultados conservando la incertidumbre en la prueba de aisladores.

- A partir de los resultados de la simulación de todos los casos de estudio que fueron planteados se ha conseguido modelar al aislador ANSI DS-15, esto como consecuencia de que cada caso de estudio presenta sus propias características, como aisladores que cumplen con ambas pruebas, una sola o ninguna, y que ha sido considerada la incertidumbre que existe en la prueba de aisladores, lo cual evita que en la repetición de una prueba se obtenga los mismos resultados.
- El análisis estadístico complementario que fue realizado, el cual contempla la obtención del intervalo de confianza y la aplicación de una prueba de hipótesis usando los datos de las 5 pruebas aplicadas a cada caso de estudio, ha corroborado el cumplimiento de las normas técnicas, y, en consecuencia, permite verificar que el modelo de aislador ANSI DS-15 que fue implementado si puede ser utilizado para la simulación de las pruebas de disrupción en seco y en húmedo a baja frecuencia.

### **3.3 RECOMENDACIONES**

Teniendo en cuenta los resultados de este trabajo de integración curricular, se recomienda:

- Utilizar datos obtenidos en el laboratorio de alto voltaje de la Escuela Politécnica Nacional, debido a que todos los datos en este trabajo de integración curricular fueron obtenidos de fuentes bibliográficas que utilizan u obtienen estos valores de forma experimental.
- Hacer uso de las versiones de los softwares EMTP-RV, MATLAB y Simulink, y Microsoft Visual Studio que se indican en este trabajo de integración curricular, debido a los problemas de compatibilidad que existen entre los mismos.
- Tener en cuenta las unidades de los valores ingresados en las máscaras de todos los modelos de EMTP-RV, así como llevar un registro de las raíces aleatorias usadas y sus respectivas tasas de incremento de voltaje.
- Para el análisis estadístico complementario, realizar un mayor número de pruebas en cada caso de estudio. En este trabajo de integración curricular solamente se aplicó cada prueba 5 veces como establece la norma técnica ANSI/NEMA C.29.11-2020.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Kind, M. Kurrat, y T. H. Kopp, "Voltage-time Characteristics of Air Gaps and Insulation Coordination-Survey of 100 Years Research", *International Conference on Lightning Protection*, núm. 33rd, 2016.
- [2] T. Shindo y T. Suzuki, "A new calculation method of breakdown voltage-time characteristics of long air gaps", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, núm. 6, pp. 1556–1563, 1985, doi: 10.1109/TPAS.1985.319172.
- [3] W. Vosloo, R. Macey, y C. de Tourreil, *The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators*. Crown Publications, 2004.
- [4] L. R. P. Leite, J. A. Yanaguizawa, A. H. Shinohara, E. G. Costa, G. J. V. Xavier, y D. A. Maciel, "Experimental study of electrical breakdown voltage of a glass insulator strings with different numbers of broken units", en *Proceedings of the 2008 IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, PMHVC*, 2008, pp. 291–294. doi: 10.1109/IPMC.2008.4743639.
- [5] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*, 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [6] L. Bo, "Modeling Flashover of AC Outdoor Insulators under Contaminated Conditions with Dry Band Formation and Arcing", Arizona State University, 2012.
- [7] E. Kuffel, W. S. Zaengl, y J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, 2nd Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000.
- [8] MERNNR, "Catálogo Digital Redes de distribución de Energía Eléctrica", 2011. <https://www.unidadespropiedad.com/> (consultado dic. 11, 2022).
- [9] "American National Standard for Composite Insulators Distribution Deadend Type", *ANSI/NEMA C29.13-2018*.
- [10] R. Arora y W. Mosch, *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, 1st Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [11] N. Tanthanuch, N. Phloymuk, K. Odthanu, y A. Singhasathein, "The variation of volt-time characteristics for suspension string insulators equipped in the distribution systems", en *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, ECTI-CON 2014*, 2014. doi: 10.1109/ECTICon.2014.6839709.
- [12] Z. Datsios, P. Mikropoulos, y T. Tsovilis, "Insulator String Flashover Modelling with the Aid of an ATPDraw Object", *46th International Universities Power Engineering Conference*, 2011.
- [13] J. L. Devore, *FUNDAMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA*, Primera Edición. Mexico: Cengage Learning Editores S.A., 2019.
- [14] "American National Standard Composite Insulators - Test Methods", *ANSI/NEMA C29.11-2020*.

- [15] F. Avilés, “Hojas Guía de Laboratorio de Alto Voltaje”, 2007. Consultado: dic. 19, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10017>
- [16] E. Garcés y D. Rodríguez, “ANÁLISIS MATEMÁTICO DE AISLAMIENTO APLICADO A AISLADORES DE PORCELANA, POLÍMERO Y VIDRIO, A NIVEL DE 13.8 kV”, Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil, Guayaquil, 2015.
- [17] M. Hidalgo, “Variabilidad climática interanual sobre el distrito metropolitano de Quito asociada a ENOS”, *CienciaAmérica: Revista de Divulgación Científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, Quito, 2017. Consultado: dic. 28, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/367/3671560005/index.html>

## 5 ANEXOS

- **ANEXO I.** GUÍA DE MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIO EN EL SOFTWARE EMTP - RV.....62
- **ANEXO II.** NIVEL DE CONTAMINACIÓN DE UN AISLADOR.....85
- **ANEXO III.** METODOLOGÍA PARA IMPLEMENTACIÓN DE INTERFAZ DE EMTP - RV CON SIMULINK DE MATLAB Y PARA CREACIÓN Y ENMASCARAMIENTO DE SUBSISTEMAS EN EMTP - RV.....87
- **ANEXO IV.** MODELOS EN SIMULINK DEL BLOQUE CVt CURVA VOLTAJE – TIEMPO.....97
- **ANEXO V.** RESULTADOS DE CASOS DE ESTUDIO.....99