

**TENSIÓN DE CHISPA. DETERMINACIÓN Y TRATAMIENTO ESTADÍSTICO
DE RESULTADOS**

JEAN PAUL ALVAREZ CALDERON

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2011

**TENSIÓN DE CHISPA. DETERMINACIÓN Y TRATAMIENTO ESTADÍSTICO
DE RESULTADOS**

JEAN PAUL ALVAREZ CALDERON

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero electricista**

DIRECTOR

ING. MPE. JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO

Ingeniero electricista – Magister en potencia eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES**

BUCARAMANGA

2011

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Más que a nadie le dedico este logro alcanzado a mi hermosa madre, Alexis calderón, por la paciencia que me tuvo y el esfuerzo realizado todos estos años para llevar a cabo esta meta en mi vida.

A mis 3 hermanos, Johan, Jeyk y Jeremy, por ser motivación diaria para continuar a pesar de cualquier inconveniente con este objetivo. Gracias Johan.

Al profesor Julio César Chacón Velasco por su asesoría, enseñanza y acompañamiento en este proyecto.

A mis amigos y compañeros por hacer más llevadera esta experiencia, William, Julieth, Chaly, kiki, cocho, Mc Clain, Margarita, Prada, Beltrán,

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN.....	14
1. GENERALIDADES.....	16
1.1 DESCARGA DISRUPTIVA	16
1.2 IMPULSOS DE TENSIÓN	17
1.3 ELECTRODOS.....	19
1.4 TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$	22
2. ENSAYOS PARA LA DETERMINAR LA TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$	25
2.1 MÉTODO DE ENSAYO UP AND DOWN	25
2.1.1 Tensión inicial (V_0).	25
2.1.2 Incremento de tensión (ΔV).....	28
2.1.3 Aplicación metodología Up and Down.	29
2.2 MÉTODO DE ENSAYO NIVELES MÚLTIPLES	32
3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO PARA LAS PRUEBAS UP AND DOWN Y NIVELES MÚLTIPLES	35
3.1 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO SEGÚN LA NORMA IEEE STD 4 DE 1995 “Standard techniques for high-voltaje testing”.....	35
3.1.1 Tratamiento de resultados según la metodología Up and Down.....	35
3.1.2 Tratamiento de resultados según la metodología niveles múltiples.....	37
3.2 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE ACUERDO AL MÉTODO DE DIXON Y MOOD.....	45
4. CORRECCIÓN POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE LA TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$	49
4.1 PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS PARA DISTANCIAS DE SEPARACIÓN MAYORES A UN METRO SEGÚN LA NORMA IEEE STD 4 DE 1995.....	50
4.1.1 Factor de corrección por densidad del aire (k_1).....	51
4.1.2 Factor de corrección por humedad (k_2).....	52
4.2 PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS PARA DISTANCIAS DE SEPARACIÓN MENORES A UN METRO SEGÚN LA NORMA IEEE STD 4a DE 2001.....	58
5. TRATAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS.....	62
5.1 EQUIPO Y MONTAJE	62

5.1.1 Sistema Generador de Impulsos.....	64
5.1.2 Divisor Capacitivo.....	68
5.1.3 Osciloscopio.....	70
5.1.4 Objeto de prueba.....	71
5.2 TRATAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS	73
6. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	86
7. BIBLIOGRAFIA.....	89
ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Onda completa impulso atmosférico.	18
Figura 2. Configuraciones electródicas y su correspondiente factor electrogeométrico.	20
Figura 3. Procedimiento para ensayo Up and Down.....	30
Figura 4. Esquema pruebas Up and Down.....	31
Figura 5. Procedimiento para ensayo niveles múltiples.....	33
Figura 6. Esquema pruebas niveles múltiples.....	34
Figura 7. Formato papel probabilístico gaussiano.....	39
Figura 8. Representación grafica del las probabilidades para cada nivel de tensión del esquema de la figura 6.	41
Figura 9. Tabla de distribución normal.	42
Figura 10. Regresión lineal para los datos de la tabla 3.....	44
Figura 11. Curvas para determinar humedad absoluta y relativa.	53
Figura 12. k en función de (h/δ)	55
Figura 13. Coeficientes m y w en función del parámetro g.....	57
Figura 14. Coeficientes m y w en función del parámetro g.....	58
Figura 15. m y n en función de la distancia de separación interelectródica.....	59
Figura 16. k en función de la humedad absoluta.....	60
Figura 17. Coeficientes m, n y w en función de la configuración electroica y el tipo de tensión aplicada.....	61
Figura 18. Circuito de prueba y medida.	62
Figura 19. Consola de mando tipo GC 222.....	65
Figura 20. Unidad de carga tipo LGR 100/15.	66
Figura 21. Generador de impulsos tipo SGS 800/20.	66
Figura 22. Circuito equivalente para el generador de impulso tipo SGS 800/20.....	67
Figura 23. Divisor capacitivo marca Haefely.....	69
Figura 24. Osciloscopio digital marca Fluke.	71
Figura 25. Configuración electroica punta-placa.....	72
Figura 26. Montaje de los electrodos punta-placa.....	73

Figura 27. Regresión lineal de la tensión de chispa vs distancia de separación interelectródica para configuración punta-punta.	77
Figura 28. Regresión lineal de la tensión de chispa vs distancia de separación interelectródica para configuración punta-placa.....	80

LISTA DE TABLAS

pág

Tabla 1. Resultados para las pruebas del esquema de la figura 4 según la metodología Up and Down.	36
Tabla 2. Resultados para las pruebas del esquema de la figura 6 según la metodología Niveles múltiples.	40
Tabla 3. Variable z para las diferentes probabilidades de descarga presentadas en las pruebas del esquema de la figura 6 según la metodología niveles múltiples.	43
Tabla 4. Resultados para las pruebas del esquema de la figura 4 según la metodología Up and Down.	46
Tabla 5. Resultados de la tensión de chipa para las pruebas del esquema de la figura 4 según la norma IEEE std 4 de 1995 y Dixon y Mood.	48
Tabla 6. Condiciones atmosféricas estandarizadas.	50
Tabla 7. Contenido de vapor de agua del aire saturado en función de la temperatura.	54
Tabla 8. Características técnicas del generador de impulso tipo SGS 800/20.	67
Tabla 9. Características técnicas del divisor capacitivo HAEFELY tipo CS 100.	69
Tabla 10. Condiciones atmosféricas del laboratorio durante las pruebas.	74
Tabla 11. Resultados obtenidos anteriormente para configuración punta-punta.	75
Tabla 12. Normalización de los resultados de la tensión de chispa para configuración punta-punta.	76
Tabla 13. Resultados obtenidos anteriormente para configuración punta-placa.	78
Tabla 14. Normalización de los resultados de la tensión de chispa para configuración punta-placa.	79
Tabla 15. Número de soportes antes de la primera chispa efectiva vs factor de la ecuación experimental 2.1.	82
Tabla 16. Parámetros de la prueba.	83
Tabla 17. Resultados de la prueba.	84
Tabla 18. Resumen resultados de la prueba.	84
Tabla 19. Tensión de chispa según la norma IEEE std de 1995 y Dixon y Mood para la metodología Up and Dow del caso experimental realizado.	85

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Protocolo de resultados experimentales.	92
Anexo B. Manual de usuario V50UD.....	93
Anexo C. Listado código V50UD.....	98

RESUMEN

TITULO: TENSION DE CHISPA. DETERMINACION Y TRATAMIENTO ESTADISTICO DE RESULTADOS*

AUTOR: ALVAREZ, Calderón Jean Paul **

PALABRAS CLAVES: tensión de chispa, impulsos atmosféricos, Up and Down, niveles múltiples, punta-punta, punta-placa.

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO:

El estado del arte relacionado a las metodologías para la determinar la tensión de chispa es escaso, disperso y ligero. En este trabajo se presenta una descripción detallada de los procedimientos estipulados por la norma IEEE para la ejecución de las metodologías Up and Down y niveles múltiples, al igual que los procedimientos estadísticos de los resultados de estas y el propuesto por Dixon y Mood para la determinación de la tensión de chispa. Se proponen nuevos elementos en los procedimientos para la aplicación de la metodología Up and Down. Se describen también los procedimientos de normalización o corrección por condiciones atmosféricas propuestos por la norma IEEE std 4 de 1995 y su adición IEEE std 4a de 2001 para distancias de separación interelectrónica mayores y menores a un metro respectivamente.

Se realiza un caso experimental para determinar la tensión de chispa a una configuración electroica punta-placa, utilizando los procedimientos mencionados y aplicando los nuevos elementos propuestos en este trabajo de grado para mostrar la forma de aplicación de estos sirviendo de guía en la aplicación de esta metodología.

Se presenta también un programa de interface grafica en MATLAB que utiliza los procedimientos estadísticos y de normalización anteriormente mencionados para determinar la tensión de chispa además de otras funciones.

* Trabajo de grado.

**Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Ing MPE. Julio C. Chacón Velasco.

ABSTRACT

TITLE: FLASHOVER VOLTAGE. DETERMINATION AND STATISTICAL TREATMENT OF RESULTS*

AUTHOR: ALVAREZ, Calderón Jean Paul **

KEY WORDS: flashover voltage, lightning impulses, Up and Down method, multiple levels method, rod-rod, rod-plane.

PROJECT DESCRIPTION:

The state of the art related to the methodologies to determine the flashover voltage is limited, scattered and lightly. In this degree project a detailed description is presented about the procedures specified by IEEE norm during the execution of Up and Down and multiple levels methods, also the statistical analysis of the results of these methods and Dixon and Mood procedures on determination of the flashover voltage. New elements for the execution of Up and down methods are proposed in this work. The correction for atmospheric condition procedures shown by IEEE std 4 -1995 and its amendment IEEE std 4a -2001 are also described for lengths separation higher and lesser than one meter respectively.

An experimental case is made to determinate the flashover voltage for a rod-plane configuration using the procedures listed above and applying the new elements proposed in this work to show the way in executing and serving as a guide for Up and Down method

In this work is presented a program with graphical interface made in MATLAB called V50UD that used the corrections and statistical procedures listed above for determinate the flashover voltage including others functions.

* Degree Project.

** Physical Mechanics Engineerings Faculty. School of Electric Electronic and Telecommunications. Ing MPE. Julio C. Chacón Velasco.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de las investigaciones en el área de la alta tensión según el estado del arte en el país es el mejoramiento de los niveles de aislamiento en un sistema eléctrico relacionado con las distancias de seguridad entre personas y equipos energizados o entre equipos, debido a que una gran tensión en una distancia corta puede ocasionar una disrupción, dañando así el sistema y poniendo en riesgo la vida de las personas. Dicha disrupción se conoce como tensión de chispa o tensión de 50%, que es aquella tensión en la cual hay 50% de probabilidad que ocurra falla para una configuración de electrodos en representación de sistemas de aislamientos reales, en este caso se utiliza como aislante gaseoso al aire. Esta tensión de chispa obedece a parámetros puramente aleatorios, lo que hace necesario utilizar métodos estadísticos para determinarla y que serán descritos en este trabajo.

Cualquier configuración física real entre dos elementos energizados separados por una distancia, puede representarse teóricamente en el laboratorio a través de las configuraciones de electrodos punta-punta y punta-placa. De aquí surge la importancia y utilidad de este trabajo de grado, ya que permitirá revisar algunos métodos para determinar la tensión de chispa la cual es responsable de dicha disrupción y ayudar a la coordinación de aislamientos en los equipos conectados a un sistema eléctrico, esto en condiciones de laboratorio para su posterior corrección y aplicación a configuraciones reales en un sistema eléctrico.

Existen diferentes métodos (*up and Down* y *niveles múltiples*) para determinar la tensión de chispa y también métodos estadísticos (IEEE STD 4 DE 1995 y *Dixon y Mood*) para el tratamiento de los resultados obtenidos. Estos métodos se encuentran dispersos en la literatura relacionada, por esta razón esta información es recopilada y descrita en este documento y servirá como guía para realizar el procedimiento de cálculo de la tensión de chispa a condiciones de laboratorio al igual que los procedimientos recomendados por la norma (IEEE STD 4 DE 1995 e IEEE STD 4a de 2001) relacionados a la corrección

por condiciones atmosféricas de los resultados para distancias interelectrónica mayores y menores a un metro.

Se realizó un caso experimental para determinar la tensión de chispa para una configuración electródica. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, y se utilizó la onda tipo impulso atmosférico (1,2/50 μ S) de polaridad positiva adoptada por los comités internacionales. La configuración electródica utilizada fue punta-placa y la metodología utilizada en los ensayos para determinar la tensión de chispa fue la *up and Down*.

Se presenta también el listado en MATLAB® de un programa con interface grafica diseñado por el autor de este trabajo, en el cual se desarrolla el método *Up and Down*, el tratamiento estadístico de los resultados (IEEE STD 4 DE 1995 y *Dixon y Mood*) y los procedimientos de corrección por condiciones ambientales descrito por la norma (IEEE STD 4 DE 1995 e IEEE STD 4a de 2001) para determinar la tensión de chispa a condiciones de laboratorio y normalizada, contribuyendo de esta manera con una herramienta útil relacionada al cálculo de la tensión de chispa.

1. GENERALIDADES

1.1 DESCARGA DISRUPTIVA

El fenómeno de descarga disruptiva o chispa eléctrica hace referencia a la falla del aislamiento de una configuración electródica sometida a un esfuerzo dieléctrico, en la cual dicha descarga atraviesa el aislamiento bajo prueba reduciendo la tensión entre los electrodos llevándola prácticamente a cero y generando un flujo de corriente entre estos que tiende a ser muy alto y dañino para los equipos y además pone en riesgo la seguridad de personas y animales. El medio aislante puede ser líquido, sólido, gaseoso o combinación de estos.

Según el tipo de aislamiento donde ocurra la descarga disruptiva, a esta se asocian diferentes términos, es decir, si la descarga se produce en medios gaseosos o líquidos se le conoce como **sparkover**, si esta ocurre a través de un aislamiento sólido se conoce como **puncture** y conocida como **flashover** cuando esta ocurre sobre la superficie de un dieléctrico en un medio líquido o gaseoso.

La distancia de separación entre electrodos afecta directamente el proceso de descarga puesto que esta determina el fenómeno físico que generará dicha descarga, es decir, la literatura muestra que para distancias menores a 1 metro de distancia entre electrodos, la descarga se inicia o desarrolla a través del fenómeno denominado **streamer** y para mayores a 1 metro esta descarga inicia igualmente con **streamer** pero además se finaliza con el fenómeno de **canales**. [Ref 2]. Por esta razón la norma IEEE std4 establece dos procedimientos de corrección por condiciones atmosféricas de la tensión de chispa según la distancia de separación (mayor o menor a 1 metro), este tema será tratado en el capítulo 4 de este trabajo.

La tensión relacionada con la descarga disruptiva, es decir, la que genera la chispa eléctrica, es conocida como tensión de chispa o tensión disruptiva y es aquel valor máximo de tensión que precede a la descarga y no aquel existente en el momento de la chispa.

Una descarga disruptiva o chispa obedece a parámetros puramente aleatorios cuando a la configuración electródica se le aplican tensiones de tipo impulsional, es decir, cuando un número de impulsos de tensión es aplicado a una configuración electródica, solo un porcentaje de estos impulsos producirán descarga.

1.2 IMPULSOS DE TENSIÓN

Los disturbios que se presentan regularmente en los sistemas eléctricos de potencia de transmisión y distribución son frecuentemente producidos por dos tipos de tensiones transitorias de amplitudes elevadas que pueden exceder altamente los valores pico de las tensiones normales de operación en A.C. de los sistemas.

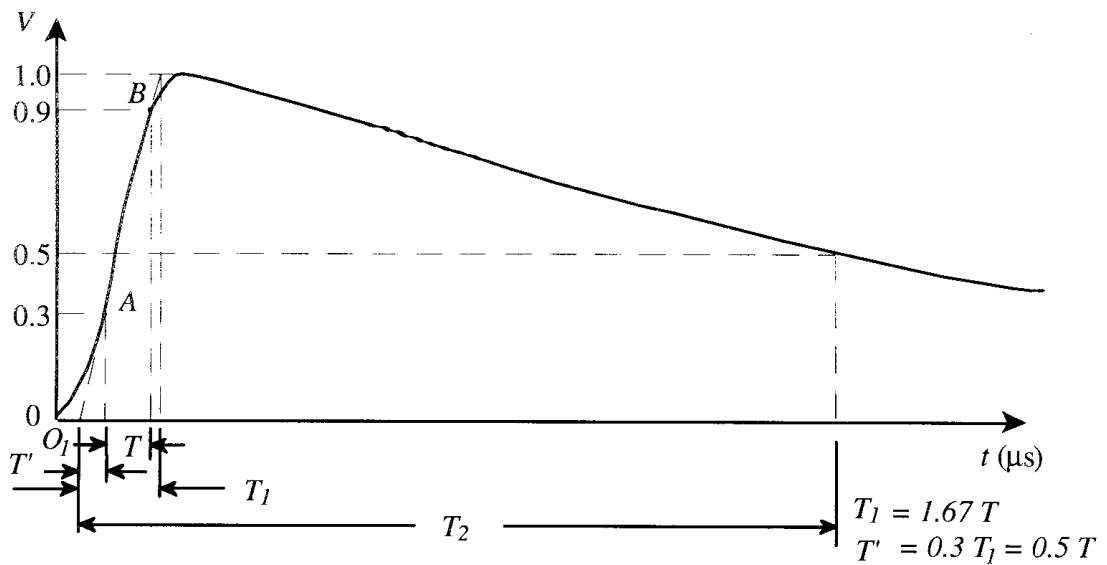
El primer tipo de estas sobretensiones son los impulsos atmosféricos y corresponden a descargas atmosféricas conocidas como rayos sobre un sistema eléctrico, estas pueden caer en las líneas o partes de las subestaciones. El otro tipo de sobretensiones es generado por las maniobras efectuadas en los sistemas de distribución tales como aperturas o cierre de líneas, energización de equipos, etc.

La norma define dos tipos de impulsos que son: **Impulsos Atmosféricos** (IA) e **Impulsos Maniobra** (IM), que están de acuerdo con el origen de los transitorios más frecuentes. En este trabajo de grado se emplea el impulso atmosférico por lo cual se detallará a continuación.

➤ Impulso atmosférico

Es un impulso de tensión con tiempos de frente que varían desde un microsegundo hasta unas decimas de microsegundos. La forma típica de este tipo de impulso se representa en la figura 1.

Figura 1. Onda completa impulso atmosférico.



Fuente: Norma IEEE std 4 de 1995.

El origen virtual O_1 se define como el punto por donde la línea AB corte el eje del tiempo. El tiempo virtual T_1 se define solamente para las ondas completas o para aquellas donde el recorte está hecho en la cresta o la cola de la misma.

El punto A se define al 30% del nivel de tensión ya que en muchos de los oscilogramas de medida de estos impulsos es muy difícil encontrar una pendiente uniforme a partir del primer incremento de la tensión. Así mismo para la mayoría de los casos el tiempo T_1 es de $1,2 \mu\text{s}$, y el tiempo para el valor medio o tiempo de cola T_2 es de $50 \mu\text{s}$.

Según las especificaciones dadas por la norma IEEE, se permite una tolerancia de $\pm 30\%$ para T_1 y de $\pm 20\%$ para T_2 es decir:

$$T_1 = 1,2 \pm 30\%$$

$$T_2 = 50 \pm 20\%$$

Debido a que los impulsos de tensión son referenciados como T_1/T_2 , entonces la onda 1,2/50 es la aceptada actualmente como la onda tipo impulso atmosférico (IA) con sus respectivas tolerancias.

1.3 ELECTRODOS

Las tensiones de descarga disruptiva $V_{50\%}$ para algunas configuraciones reales en un sistema eléctrico que presenten campos no uniformes se enmarcan dentro de los arreglos de electrodos punta-punta y punta-placa.

En los sistemas de altas tensiones se encuentran una gran variedad de formas de electrodos y perfiles de terminación, por esta razón se ha pretendido estandarizar estas diferentes formas de los electrodos basándose en muchos casos en el efecto corona y considerando un factor electrogeométrico K_g el cual se define como la relación del esfuerzo positivo producido por un impulso maniobra en el tiempo crítico a la cresta, a aquel que se produce en una configuración punta-placa que presenta la misma separación interelectródica.

Este factor electrogeométrico K_g para la configuración punta-placa es igual a 1 y se busca que las demás configuraciones electródicas de prueba conocidas puedan ser representadas a través de él.

Por ejemplo, para la configuración punta-punta, se tiene la expresión:

$$K_g = e^{\left(\frac{0,5h}{h+d}\right)} \quad (1.1)$$

En la cual:

h= altura del electrodo aterrizado a tierra.

d= distancia de separación interelectródica.

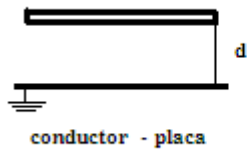
Esto permite determinar la tensión de chispa para la configuración punta-punta, a partir de los resultados obtenidos para una configuración punta-placa como muestra la ecuación (1.2)

$$V_{50\% \text{ punta-punta}} = K_g * V_{50\% \text{ punta-placa}} \quad (1.2)$$

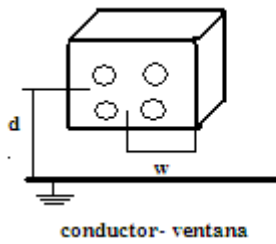
En la figura 2 se presentan algunas de las configuraciones de prueba y sus correspondientes factores electrogeométricos.

Figura 2. Configuraciones electródicas y su correspondiente factor electrogeométrico.

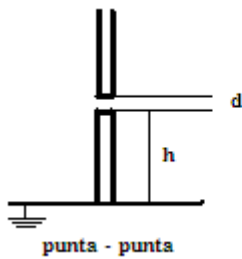
CONFIGURACIÓN	FACTOR ELECTROGEOMÉTRICO K_g
 <p>punta - punta</p>	1



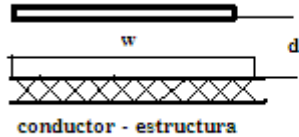
$$1.15$$



$$1.2$$



$$e^{\frac{0.5h}{h+d}}$$



$$1.1 + \frac{0.3}{1 + \frac{w}{d}}$$

Fuente: RUGELES, julio. Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión. EdicionesUIS. 2a edición.

Los electrodos a trabajar en este proyecto de grado son los electrodos punta-punta y punta-placa que serán descritos en el capítulo 5 con los cuales se realizó el ensayo Up and Down y que son los disponibles en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander.

1.4 TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$

En las normas IEEE e IEC se define la tensión de chispa $V_{50\%}$ como el voltaje de descarga disruptivo en el cual se presenta una probabilidad del 50% de producir una descarga a un aislamiento, esto es, que la mitad de los voltajes aplicados a este nivel generarán una descarga. Este valor también se conoce como **Tensión Crítica de Flameo (CFO)**.

El valor de esta tensión es muy importante en las aplicaciones relacionadas a la coordinación de aislamiento, ya que a partir de este valor pueden determinarse los niveles de aislamientos básicos **BIL** y **SIL** los cuales corresponden al valor de tensión a la cual existe el 10% de probabilidad de descarga para un aislamiento para impulso atmosférico e impulsos maniobra respectivamente. De forma general la tensión de chispa es utilizada para determinar la tensión de descarga a cualquier probabilidad a través de la siguiente expresión.

$$V = (1 + z\sigma_{pu})V_{50\%} \quad (1.3)$$

En donde:

V : Es la tensión en kV para cualquier probabilidad de descarga.

$V_{50\%}$: Es la tensión de chispa en kV con 50% de probabilidad de descarga.

z : Parámetro estadístico que varía según la probabilidad de descarga deseada, esta se encuentra en tablas de la distribución normal y es adimensional.

σ_{pu} : Desviación estándar en por unidad.

La desviación estándar en por unidad (σ_{pu}) según la norma IEEE para impulsos atmosférico es igual a 3% y para impulsos maniobra al 5%. Esta se expresa como la relación de la desviación estándar (σ) en kV y la tensión de

chispa $V_{50\%}$. (Ecuación 1.4). Se recuerda que para calcular el BIL se utiliza el impulso atmosférico, por lo tanto se toma la desviación estándar por unidad (σ_{pu}) del 3%, y para el SIL el impulso maniobra con el valor para esta desviación en por unidad del 5%.

$$\sigma_{pu} = \frac{\sigma}{v_{50\%}} \quad (1.4)$$

Particularmente para los niveles de aislamiento BIL y SIL en función de la tensión de chispa $V_{50\%}$, se tienen las expresiones siguientes.

$$BIL = 0,9616V_{50\%} \quad (1.5)$$

$$SIL = 0,936V_{50\%} \quad (1.6)$$

Existen diferentes procedimientos experimentales para realizar el cálculo de la tensión $V_{50\%}$ entre los cuales se destacan: las pruebas de niveles múltiples, las pruebas Up and Down y pruebas de descargas sucesivas, entre otros.

Para determinar esta tensión se utilizan impulsos de tensión de polaridad positiva ya que los valores de tensión de descarga proporcionados por estos son menores que los proporcionados por aquellos con polaridad negativa, lo cual hace que desde el punto de vista práctico sean más importante los resultados para determinar la tensión de chispa utilizando impulsos de polaridad positiva.

Este impulso atmosférico de polaridad positiva (IA+) en el laboratorio es generado por un generador de impulsos, que, como lo indica su nombre, es un dispositivo diseñado para generar señales impulsionales de amplitud variable,

este dispositivo junto con otros necesarios para determinar la tensión de chispa en el laboratorio serán descritos en el capítulo 5 de este trabajo.

En este trabajo de grado se estudiarán las metodologías Up and Down y de niveles múltiples.

2. ENSAYOS PARA LA DETERMINAR LA TENSION DE CHISPA $V_{50\%}$

Como se anotó en el capítulo 1 de este trabajo, la tensión de chispa es un parámetro de gran relevancia en el área de la alta tensión, más específicamente en lo relacionado a la coordinación de aislamientos. Como se mencionó anteriormente existen diferentes metodologías para determinarla, como son las de niveles múltiples, la up and Down y la de las descargas sucesivas, entre otras. En este capítulo se estudiarán las correspondientes al Up and Down y al de niveles múltiples.

2.1 MÉTODO DE ENSAYO UP AND DOWN

Este método se utiliza en los ensayos que se efectúan con ondas tipo impulso atmosférico e impulsos maniobra. Este ensayo permite una estimación bastante acertada de la tensión de chispa cuando esta se comporta como una población normalmente distribuida, con este ensayo también es posible conocer una estimación de la desviación estándar de los resultados.

Para realizar esta prueba es necesario inicialmente definir correctamente dos parámetros importantes para la ejecución de esta, los cuales son un valor de tensión inicial (V_0) y el incremento de tensión (ΔV).

2.1.1 Tensión inicial (V_0).

Debido a que en la literatura relacionada a estas pruebas, no se especifica este valor ni la forma de obtenerlo, ya que no existe una base teórica formal, este debe ser estimado basado en experiencias previas con configuraciones electrónicas similares.

Determinar la tensión inicial correctamente es muy importante para realizar este ensayo, ya que si la tensión inicial seleccionada para una determinada prueba queda muy por debajo del primer impulso efectivo, se necesitarán varias o muchas descargas del generador para llegar a esta lo cual implicaría pérdida de tiempo, energía, vida útil de los equipos y por lo tanto dinero, pero si por el contrario, este valor se selecciona por encima o muy ajustado al primer impulso efectivo, los resultados pierden confiabilidad y es básicamente porque la tensión de chispa $V_{50\%}$ pudo haber quedado por debajo o ser menor que la tensión inicial V_0 . Se recomienda para obtener resultados confiables, que existan a lo sumo cuatro pasos de tensión antes de llegar a la primera chispa efectiva.

Se considera el primer impulso efectivo a la primera chispa y en el que a partir de este los datos son estadísticamente relevantes.

En el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, según la experiencia y las pruebas realizadas durante varios años, se propone una expresión aproximada (ecuación 2.2) para establecer el valor inicial de tensión para estas pruebas, cabe recalcar que esta expresión es totalmente experimental, pero brinda una estimación aproximada y sirve de referencia para determinar esta tensión inicial.

$$V_0 = V_{50\%}^* - (1,5 \text{ a } 3)(0,03)V_{50\%}^* \quad (2.1)$$

Donde:

$V_{50\%}^*$ Es la tensión de chispa esperada para la configuración electródica y que será especificada a continuación.

➤ **Tensión de chispa estimada $V_{50\%}^*$**

Existen varias maneras aproximadas y no formales de estimar la tensión de chispa esperada para una configuración electródica o equipos, tales como:

- Conociendo el nivel de aislamiento básico (BIL) del equipo y utilizando la ecuación 1.5 se puede estimar la tensión $V_{50\%}$.
- Por comparación de dispositivos sin caracterizar con aquellos probados y caracterizados.
- Por medio de configuraciones electródicas estandarizadas (punta- punta y punta-placa) a través de relaciones conocidas.
- Por catálogos de productos.

La Electricite de France y British standar han propuesto expresiones que relacionan la tensión de chispa $V_{50\%}$ con la distancia interelectródica, de esta manera se puede tener una estimación de dicha tensión, pero experimentalmente se ha comprobado que estas expresiones resultan ser validas para distancias grandes, alrededor de los dos metros de separación interelectródica y que para distancias pequeñas, menores a 1 metro introducen errores significativos a los resultados.

Para impulso atmosférico de polaridad positiva según la Electricite de France:

$$V_{50\%} = K_g \frac{3400}{1 + \frac{8}{d}} \quad (2.2)$$

Y Según British:

$$V_{50\%} = K_g 530d \quad (2.3)$$

Donde K_g es el factor electrogeométrico en ambos casos descrito en el capítulo 1. Para la configuración punta-placa se debe recordar que $k_g=1$.

Debido a que estas expresiones son válidas para distancias grandes (mayores a los 2 metros), en este trabajo de grado se vio la necesidad de proponer para la configuración punta-placa una expresión (ecuación 2.4) para distancias cortas (menores a 1 metro) basado en las experiencias y los resultados obtenidos en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander [Ref 2 y 8]. En el capítulo 6 de este trabajo se describirá el procedimiento por el cual se obtuvo dicha expresión.

$$V_{50\%} = 43 + 4,6d \quad (2.4)$$

Adicionalmente para la configuración punta-punta se propone una expresión (ecuación 2.5) utilizando el mismo procedimiento por la cual se obtuvo la expresión 2.4 que permite determinar la tensión de chispa estimada $V_{50\%}^*$

$$V_{50\%} = 45 + 5,9d \quad (2.5)$$

Se debe tener en cuenta que la distancia (d) se maneja en centímetros (cm) y la tensión de chispa obtenida en kV y se encuentra a condiciones estandarizadas, las cuales serán descritas en el capítulo 4.

2.1.2 Incremento de tensión (ΔV).

Este valor de incremento de tensión debe ser bien seleccionado ya que de este depende la sensibilidad de los resultados de la prueba, es decir, de este valor depende el número de niveles de tensión resultantes y por lo tanto la confiabilidad de los resultados obtenidos. La norma IEEE std 4 de 1995 recomienda que para impulsos atmosféricos este valor puede ser de 1,5% a 3% veces el valor de la tensión de chipa inicial estimada como muestra la ecuación (2.1). El porcentaje a seleccionar de este rango depende del criterio y

la experiencia de la persona que realice la prueba basado en la ejecución de ensayos previos.

$$\Delta V = (1,5\% \text{ a } 3\%)V_{50\%}^* \quad (2.6)$$

2.1.3 Aplicación metodología Up and Down.

Una vez determinadas la tensión inicial V_0 , el incremento de tensión (ΔV), la configuración electródica y todos los parámetros de seguridad necesarios, se procede a realizar la prueba.

Se aplica el primer impulso de tensión de valor (V_0), si en este valor aplicado no se presenta chispa, se incrementa el valor del impulso de tensión en la cantidad ΔV , si se presenta chispa debe disminuirse el valor del impulso en el mismo valor ΔV y así sucesivamente hasta completar el número de impulsos requeridos.

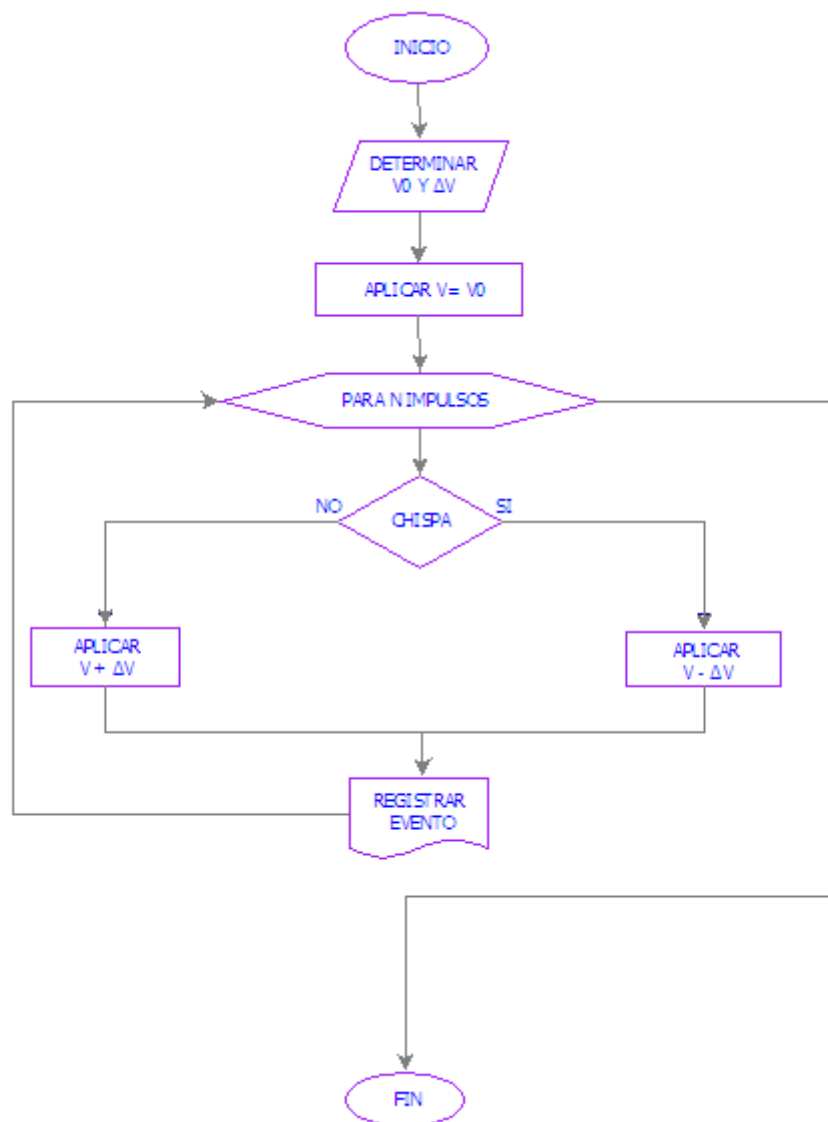
En esta prueba, el número N de impulsos aplicados a la configuración electródica generalmente no debe ser menor a 20 y sólo en los casos que se requiera y sea necesaria una mejor precisión de la $V_{50\%}$, N deberá ser igual a 60 aplicaciones de impulsos de tensión.

Como se anotó anteriormente, se considera como primer impulso efectivo aquel donde se obtiene la primera chispa.

El tiempo de aplicación entre cada nivel de tensión debe ser suficiente para garantizar la independencia entre ellos, es decir, que las condiciones sean las mismas al aplicar cada impulso de tensión, este tiempo es generalmente de 1 minuto.

A continuación se presenta el procedimiento para determinar la tensión de chispa $V_{50\%}$ por medio de un diagrama de flujo.

Figura 3. Procedimiento para ensayo Up and Down.



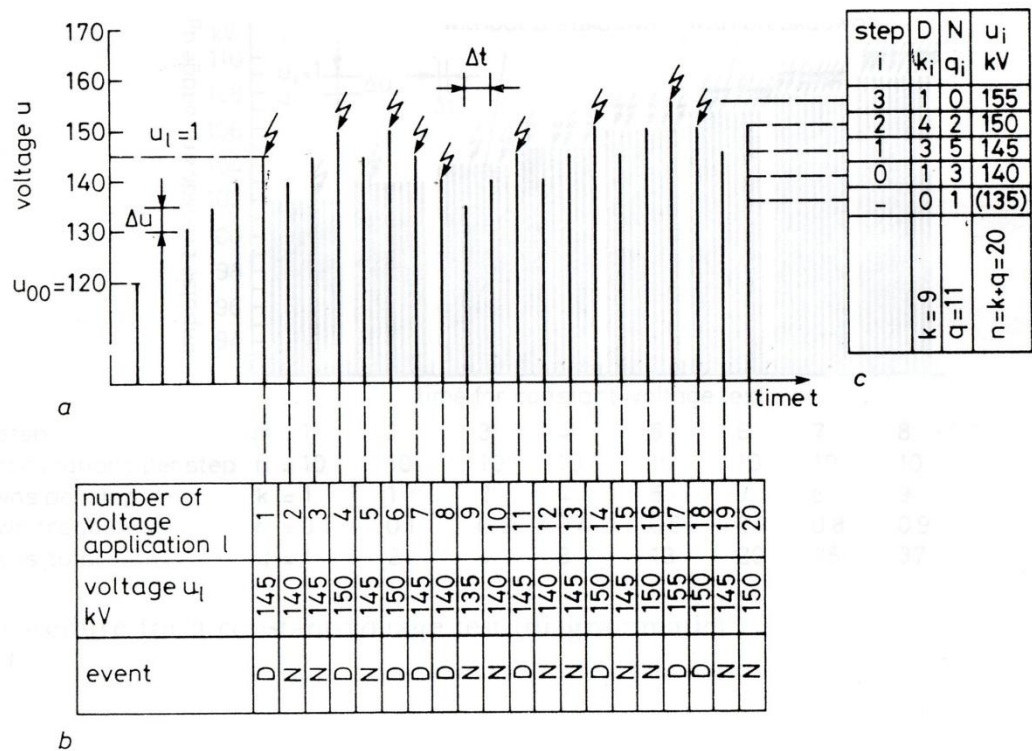
Fuente: Autor.

“Evento” hace referencia al fenómeno de chispa o soporte (no chispa).

Al realizar este ensayo se deben registrar todos los datos obtenidos en la prueba, incluyendo los datos correspondientes a las condiciones atmosféricas en el momento de la prueba para su posterior normalización (capítulo 4). Este registro se hace en una tabla u hoja de protocolo (ver anexo A) correctamente diligenciada para facilitar el tratamiento estadístico de los resultados.

Como ejemplo de la aplicación de la metodología Up and Down y el registro de datos durante esta, se muestra a continuación un esquema que facilita la comprensión de este ensayo.

Figura 4. Esquema pruebas Up and Down.



Fuente: HAUSCHILD, W. y MOSCH, W. statistical techniques for high-voltage engineering.

En el capítulo 3 se describirá el tratamiento estadístico de los datos presentados en la figura 4.

2.2 MÉTODO DE ENSAYO NIVELES MÚLTIPLES

Este ensayo usualmente se aplica en pruebas con tensiones tipo impulso, sin embargo, se extiende también a pruebas con tensión alterna y continúa.

Este método consiste en aplicar por lo menos diez impulsos de tensión a diferentes niveles de voltaje tomando un incremento entre niveles del 3% de la tensión de chispa $V_{50\%}$ probable (estimada), (ecuación 2.7) es decir, se aplican impulsos de tensión (m_i) de polaridad positiva a la configuración electroica de la prueba, ya sea punta-punta o punta-placa, a diferentes niveles de tensión (V_i), (ver figura 5). Los datos a registrar al final de este ensayo son el número de impulsos aplicados y el número de descargas disruptivas (d_i) en cada nivel.

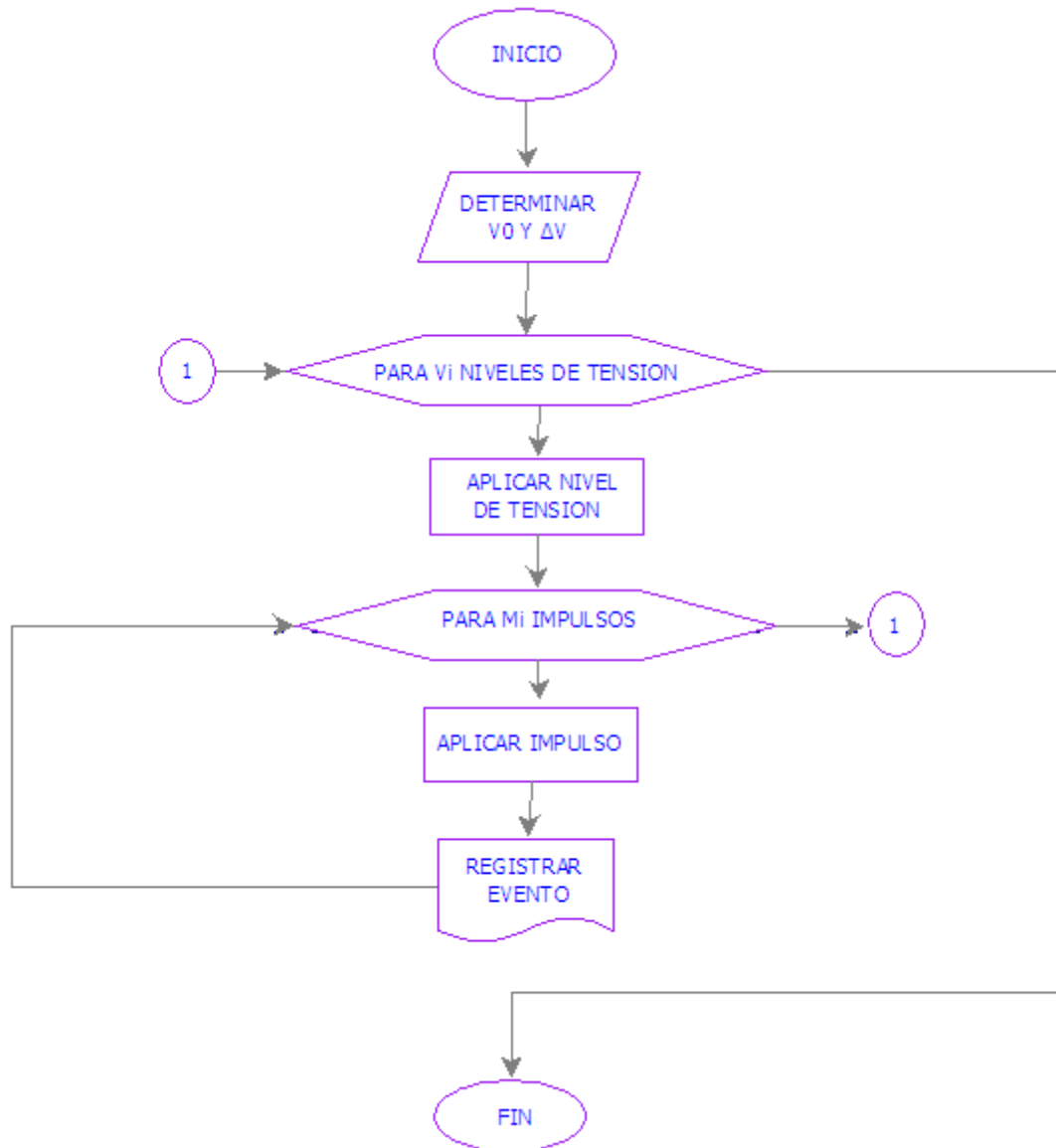
$$\Delta V_i = (0,03)V_{50\%}^* \quad (2.7)$$

Se recomienda entre cada prueba esperar un minuto para garantizar la independencia entre estas. La precisión de los resultados en este ensayo aumenta con el número de aplicaciones de tensión sin embargo, mas de 20 aplicaciones de impulso por nivel no son necesarios.

Este método también puede ser utilizado para determinar la desviación estándar de la tensión. Algunas veces una estimación del valor de tensión de chispa $V_{50\%}$ basado en experiencias anteriores de ensayos con configuraciones electródicas semejantes, puede ser más preciso que aquel calculado en un ensayo realizado con un número limitado de impulsos.

A continuación se presenta igualmente para el método de niveles múltiples el procedimiento para llevar a cabo este ensayo a través de un diagrama de flujo.

Figura 5. Procedimiento para ensayo niveles múltiples.

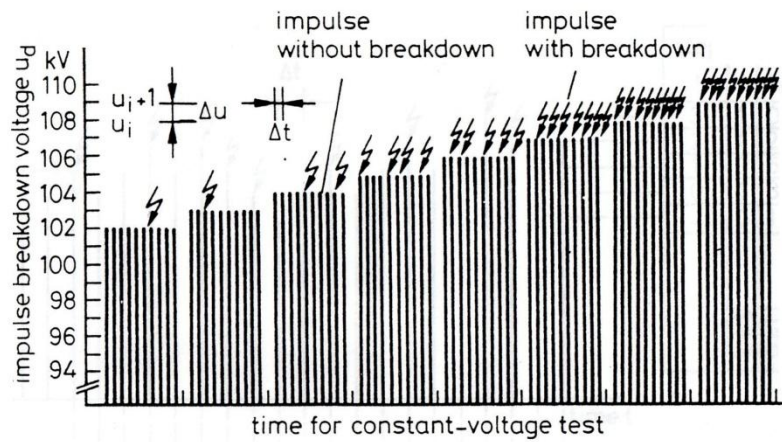


Fuente: Autor.

Al igual que en el ensayo Up and Down, se deben registrar todos los datos obtenidos durante las pruebas incluyendo las condiciones atmosféricas.

Como ejemplo del ensayo niveles múltiples y el registro de datos durante esta, se muestra a continuación un esquema que facilita la comprensión de este ensayo. El tratamiento estadístico de los datos de este esquema se presentara en el capítulo 3.

Figura 6. Esquema pruebas niveles múltiples.



voltage step	$m = 1$	2	3	4	5	6	7	8
voltage applications per step	$n = 10$	10	10	10	10	10	10	10
breakdowns per step	$k = 1$	1	2	4	5	7	8	9
breakdown frequency	$h = 0.1$	0.1	0.2	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9
breakdowns, total	$g = 1$	2	4	8	13	20	28	37

Fuente: HAUSCHILD, W. y MOSCH, W. statistical techniques for high-voltage engineering.

3. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO PARA LAS PRUEBAS UP AND DOWN Y NIVELES MÚLTIPLES

En el capítulo 2 se describieron los procedimientos experimentales para determinar la tensión de chispa $V_{50\%}$, sin embargo, hasta ahora no se puede establecer este valor sin un tratamiento estadístico a los resultados obtenidos de las pruebas presentadas anteriormente.

En este capítulo se describirán los procedimientos estadísticos propuestos por la norma IEEE Std 4 de 1995 para las pruebas Up and Down y niveles múltiples, como también el procedimiento desarrollado por **Dixon y Mood** para pruebas Up and Down.

3.1 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO SEGÚN LA NORMA IEEE STD 4 DE 1995 “Standard techniques for high-voltaje testing”

La norma IEEE std 4 de 1995 propone un método para calcular la tensión de chispa $V_{50\%}$, según el ensayo realizado, ya sea Up and Down o niveles múltiples. Estos métodos son aplicables y confiables cuando en estos ensayos se garantiza la independencia entre las estimaciones de las pruebas, es decir, donde el resultado n no es influenciado ni afectado por lo que pudo haber ocurrido en el resultado $(n-1)$.

3.1.1 Tratamiento de resultados según la metodología Up and Down.

Para esta prueba, la tensión de chispa $V_{50\%}$ se calcula como el producto de la tensión de cada nivel por el número de fláneos (chispa(X)) más soportes (no chispa(O)) sobre el número total de aplicaciones.

$$V_{50\%} = \frac{\sum(V_n N)}{\sum N} \quad (3.1)$$

Donde:

V_n : Tensión en cada nivel.

N : Número total de flámeos y soportes en cada nivel de tensión.

$\sum N$: Número total de aplicaciones.

La norma establece que la tensión de chispa $V_{50\%}$ calculada no debe diferir en más de $2\Delta V$ del nivel de tensión más bajo, es decir, esta diferencia es el máximo error tolerable para considerar la estimación de $V_{50\%}$ confiable.

A manera de ejemplo del tratamiento estadístico de los resultados para el ensayo Up and Down, se presentan a continuación los cálculos para determinar la tensión de chispa $V_{50\%}$ tomando los datos del esquema mostrado en la figura 4, utilizando el procedimiento propuesto anteriormente.

Para facilitar los cálculos, es recomendable organizar los datos (número de chispas (X) y soportes (O)) por niveles de tensión como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Resultados para las pruebas del esquema de la figura 4 según la metodología Up and Down.

Nivel de tensión (kV) (pasos)	Chispas (X)	Soportes(O)
155	1	0
150	4	2
145	3	5
140	1	3
135	0	1
Total chispas y soportes	9	11

Fuente: Autor.

Teniendo los datos organizados, se utiliza la ecuación 3.1 y se obtiene la tensión de chispa $V_{50\%}$ a condiciones de laboratorio.

$$V_{50\%} = \frac{(155 * 1) + (150 * 6) + (145 * 8) + (140 * 4) + (135 * 1)}{20}$$

$$V_{50\%} = 145,5 \text{ kV}$$

3.1.2 Tratamiento de resultados según la metodología niveles múltiples.

La probabilidad de una descarga disruptiva solo depende de las tensiones aplicadas y el comportamiento de las descargas puede ser caracterizado por una función de probabilidad $P(V)$, determinada según la evolución del proceso de las descargas. Sin embargo, en la práctica esta función de probabilidad de descarga disruptiva va a depender de por lo menos dos parámetros que son $V_{50\%}$ y z , siendo z la desviación convencional (ver ecuación 3.3).

Una buena estimación de $P(V)$ es la función de distribución normal o gaussiana la cual representa muchos de los fenómenos físicos reales que dependen de parámetros aleatorios, representada por la siguiente expresión:

$$P(V) = \frac{1}{Z\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^V e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-V_{50}}{z}\right)^2} dV \quad (3.2)$$

$$z = v_{50\%} - v_{16\%} \quad (3.3)$$

Para el tratamiento estadístico de los resultados en este ensayo, se define la variable f como la relación entre el número de descargas disruptivas d_i y el número de aplicaciones de impulsos por cada nivel de tensión m_i .

$$f_i = \frac{d_i}{m_i} \quad (3.4)$$

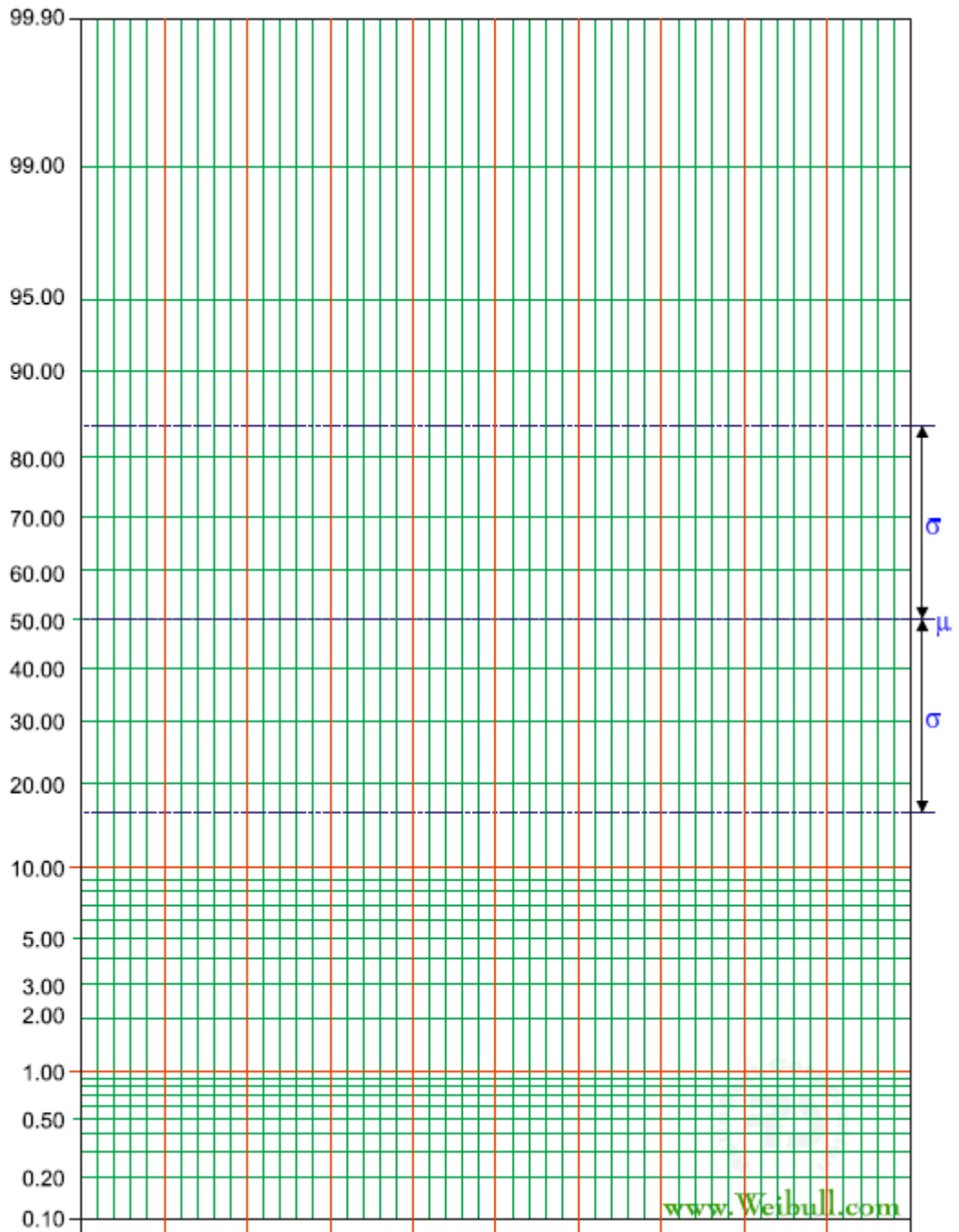
Se procede a graficar los puntos (f_i, V_i) sobre un papel probabilístico de distribución gaussiana como el mostrado en la figura 7 y se traza la mejor recta sobre los puntos obtenidos. El valor de $V_{50\%}$ es aquel valor en la grafica con la probabilidad de descarga del 50% o $P(V) = 0,5$ y la desviación es calculada según la ecuación 3.3 donde $V_{16\%}$ es aquel valor de tensión con probabilidad de descarga del 16% o $P(V) = 0,16$.

Para una mayor exactitud y para minimizar errores a veces el trazado de una línea recta sobre los puntos no es adecuado y se recurre al método de mínimos cuadrados y métodos probabilísticos para encontrar la función que mejor se ajuste al comportamiento de los puntos de la grafica, así de esta manera se reducen errores y son más confiables los resultados.

Frecuentemente los resultados en este tipo de ensayo arrojan valores de $P=0$ o $P=1$ llamados valores extremos y corresponden a cuando en todos los impulsos aplicados a un nivel de tensión hubo chispa (X) (probabilidad del 100% de descarga) y cuando no hubo en ninguna de las aplicaciones de impulso (probabilidad del 0% de descarga) respectivamente. Estos valores de P no pueden ser graficados en el papel de probabilidad Gaussiana, generando así pérdida de información valiosa e introduciendo errores en las estimaciones de $V_{50\%}$ y de z .

La norma sugiere como forma de solucionar este problema e incluir estos valores en la grafica, combinar estos valores (ya sea para $P=0$ o $P=1$) con los valores obtenidos en el nivel de tensión adyacente y graficarlos como un promedio ponderado de estos.

Figura 7. Formato papel probabilístico gaussiano.



Fuente: www.weibull.com.

El error estadístico para la prueba de niveles múltiples generalmente tiende a variar inversamente con el cuadrado del número de aplicaciones de voltaje en cada nivel y de igual forma con el número de niveles aplicados.

Para los resultados de la metodología de niveles múltiples mostrado en el esquema de la figura 6, se realizará el tratamiento estadístico para presentar un ejemplo del procedimiento para el cálculo de la tensión de chispa $V_{50\%}$.

Organizando los datos se tiene:

Tabla 2. Resultados para las pruebas del esquema de la figura 6 según la metodología Niveles múltiples.

Nivel de tensión (kV)	Número de impulsos	Chispas	Probabilidad de descarga (%)	Frecuencia de descarga
102	10	1	10	0,1
103	10	1	10	0,1
104	10	2	20	0,2
105	10	4	40	0,4
106	10	5	50	0,5
107	10	7	70	0,7
108	10	8	80	0,8
109	10	9	90	0,9

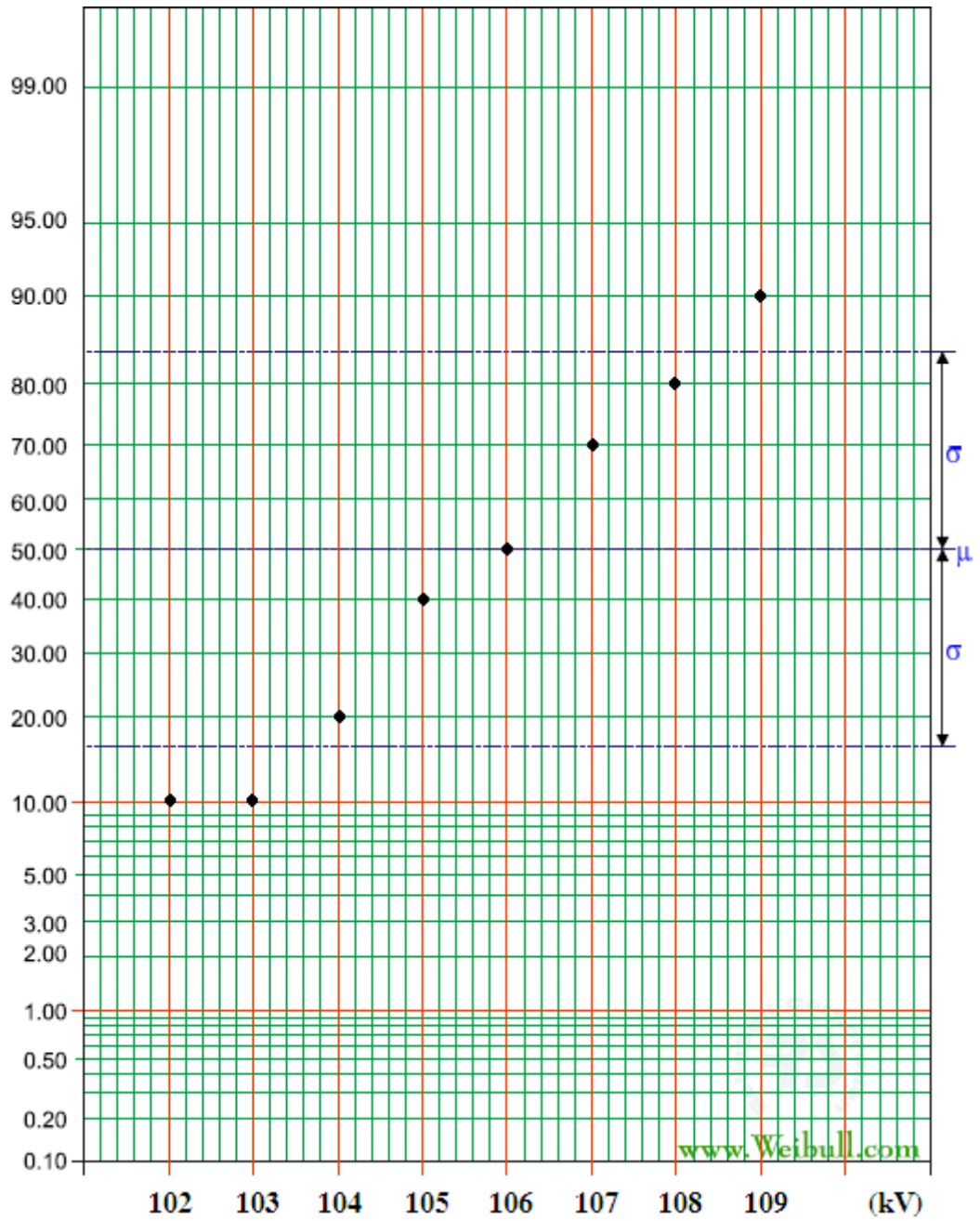
Fuente: Autor.

Un vez graficadas la probabilidad de descarga para cada nivel de tensión del ensayo, se procede a establecer por medio de una regresión lineal, la línea que mayor se ajuste al comportamiento de los datos.

Para hacer esto se deben expresar la probabilidad de descarga en función de la variable z (desviación estándar equivalente para cada probabilidad de descarga) que se obtiene de la figura 9.

Graficando en el papel probabilístico de la figura 7, se tiene:

Figura 8. Representación grafica del las probabilidades para cada nivel de tensión del esquema de la figura 6.



Fuente: Autor.

Figura 9. Tabla de distribución normal.

	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.500000	0.503989	0.507978	0.511966	0.515953	0.519939	0.523922	0.527903	0.531881	0.535856
0.1	0.539828	0.543795	0.547758	0.551717	0.555670	0.559618	0.563559	0.567495	0.571424	0.575345
0.2	0.579260	0.583166	0.587064	0.590954	0.594835	0.598706	0.602568	0.606420	0.610261	0.614092
0.3	0.617911	0.621720	0.625516	0.629300	0.633072	0.636831	0.640576	0.644309	0.648027	0.651732
0.4	0.655422	0.659097	0.662757	0.666402	0.670031	0.673645	0.677242	0.680822	0.684386	0.687933
0.5	0.691462	0.694974	0.698468	0.701944	0.705401	0.708840	0.712260	0.715661	0.719043	0.722405
0.6	0.725747	0.729069	0.732371	0.735653	0.738914	0.742154	0.745373	0.748571	0.751748	0.754903
0.7	0.758036	0.761148	0.764238	0.767305	0.770350	0.773373	0.776373	0.779350	0.782305	0.785236
0.8	0.788145	0.791030	0.793892	0.796731	0.799546	0.802337	0.805105	0.807850	0.810570	0.813267
0.9	0.815940	0.818589	0.821214	0.823814	0.826391	0.828944	0.831472	0.833977	0.836457	0.838913
1.0	0.841345	0.843752	0.846136	0.848495	0.850830	0.853141	0.855428	0.857690	0.859929	0.862143
1.1	0.864334	0.866500	0.868643	0.870762	0.872857	0.874928	0.876976	0.879000	0.881000	0.882977
1.2	0.884930	0.886861	0.888768	0.890651	0.892512	0.894350	0.896165	0.897958	0.899727	0.901475
1.3	0.903200	0.904902	0.906582	0.908241	0.909877	0.911492	0.913085	0.914657	0.916207	0.917736
1.4	0.919243	0.920730	0.922196	0.923641	0.925066	0.926471	0.927855	0.929219	0.930563	0.931888
1.5	0.933193	0.934478	0.935745	0.936992	0.938220	0.939429	0.940620	0.941792	0.942947	0.944083
1.6	0.945201	0.946301	0.947384	0.948449	0.949497	0.950529	0.951543	0.952540	0.953521	0.954486
1.7	0.955435	0.956367	0.957284	0.958185	0.959070	0.959941	0.960796	0.961636	0.962462	0.963273
1.8	0.964070	0.964852	0.965620	0.966375	0.967116	0.967843	0.968557	0.969258	0.969946	0.970621
1.9	0.971283	0.971933	0.972571	0.973197	0.973810	0.974412	0.975002	0.975581	0.976148	0.976705
2.0	0.977250	0.977784	0.978308	0.978822	0.979325	0.979818	0.980301	0.980774	0.981237	0.981691
2.1	0.982136	0.982571	0.982997	0.983414	0.983823	0.984222	0.984614	0.984997	0.985371	0.985738
2.2	0.986097	0.986447	0.986791	0.987126	0.987455	0.987776	0.988089	0.988396	0.988696	0.988989
2.3	0.989276	0.989556	0.989830	0.990097	0.990358	0.990613	0.990863	0.991106	0.991344	0.991576
2.4	0.991802	0.992024	0.992240	0.992451	0.992656	0.992857	0.993053	0.993244	0.993431	0.993613
2.5	0.993790	0.993963	0.994132	0.994297	0.994457	0.994614	0.994766	0.994915	0.995060	0.995201
2.6	0.995339	0.995473	0.995604	0.995731	0.995855	0.995975	0.996093	0.996207	0.996319	0.996427
2.7	0.996533	0.996636	0.996736	0.996833	0.996928	0.997020	0.997110	0.997197	0.997282	0.997365
2.8	0.997445	0.997523	0.997599	0.997673	0.997744	0.997814	0.997882	0.997948	0.998012	0.998074
2.9	0.998134	0.998193	0.998250	0.998305	0.998359	0.998411	0.998462	0.998511	0.998559	0.998605
3.0	0.998650	0.998694	0.998736	0.998777	0.998817	0.998856	0.998893	0.998930	0.998965	0.998999
3.1	0.999032	0.999065	0.999096	0.999126	0.999155	0.999184	0.999211	0.999238	0.999264	0.999289
3.2	0.999313	0.999336	0.999359	0.999381	0.999402	0.999423	0.999443	0.999462	0.999481	0.999499
3.3	0.999517	0.999534	0.999550	0.999566	0.999581	0.999596	0.999610	0.999624	0.999638	0.999651
3.4	0.999663	0.999675	0.999687	0.999698	0.999709	0.999720	0.999730	0.999740	0.999749	0.999758
3.5	0.999767	0.999776	0.999784	0.999792	0.999800	0.999807	0.999815	0.999822	0.999828	0.999835
3.6	0.999841	0.999847	0.999853	0.999858	0.999864	0.999869	0.999874	0.999879	0.999883	0.999888
3.7	0.999892	0.999896	0.999900	0.999904	0.999908	0.999912	0.999915	0.999918	0.999922	0.999925
3.8	0.999928	0.999931	0.999933	0.999936	0.999938	0.999941	0.999943	0.999946	0.999948	0.999950
3.9	0.999952	0.999954	0.999956	0.999958	0.999959	0.999961	0.999963	0.999964	0.999966	0.999967
4.0	0.999968	0.999970	0.999971	0.999972	0.999973	0.999974	0.999975	0.999976	0.999977	0.999978

Fuente: www.bing.com

Para utilizar la tabla de probabilidad normal se debe tener en cuenta que z es la suma del elemento de la primera columna y la primera fila para una probabilidad dada en por unidad. Se define también que para probabilidades

menores a 50% o 0,5 el valor de **z** es menor que cero y que debido a la simetría de la función que caracteriza esta tabla, que es la campana de Gauss, existe el mismo valor de **z** para dos probabilidades diferentes y simétricas. Por ejemplo: 10% y 90%, 20% y 80%, etc. Entonces si se desea conocer el valor de **z** para una probabilidad del 30% o 0,3, será el mismo valor para una probabilidad del 70% o 0,7 por simetría y con el signo negativo, por lo tanto el valor sería -0,52.

Para las diferentes probabilidades presentadas en este ensayo, se tiene:

Tabla 3. Variable z para las diferentes probabilidades de descarga presentadas en las pruebas del esquema de la figura 6 según la metodología niveles múltiples.

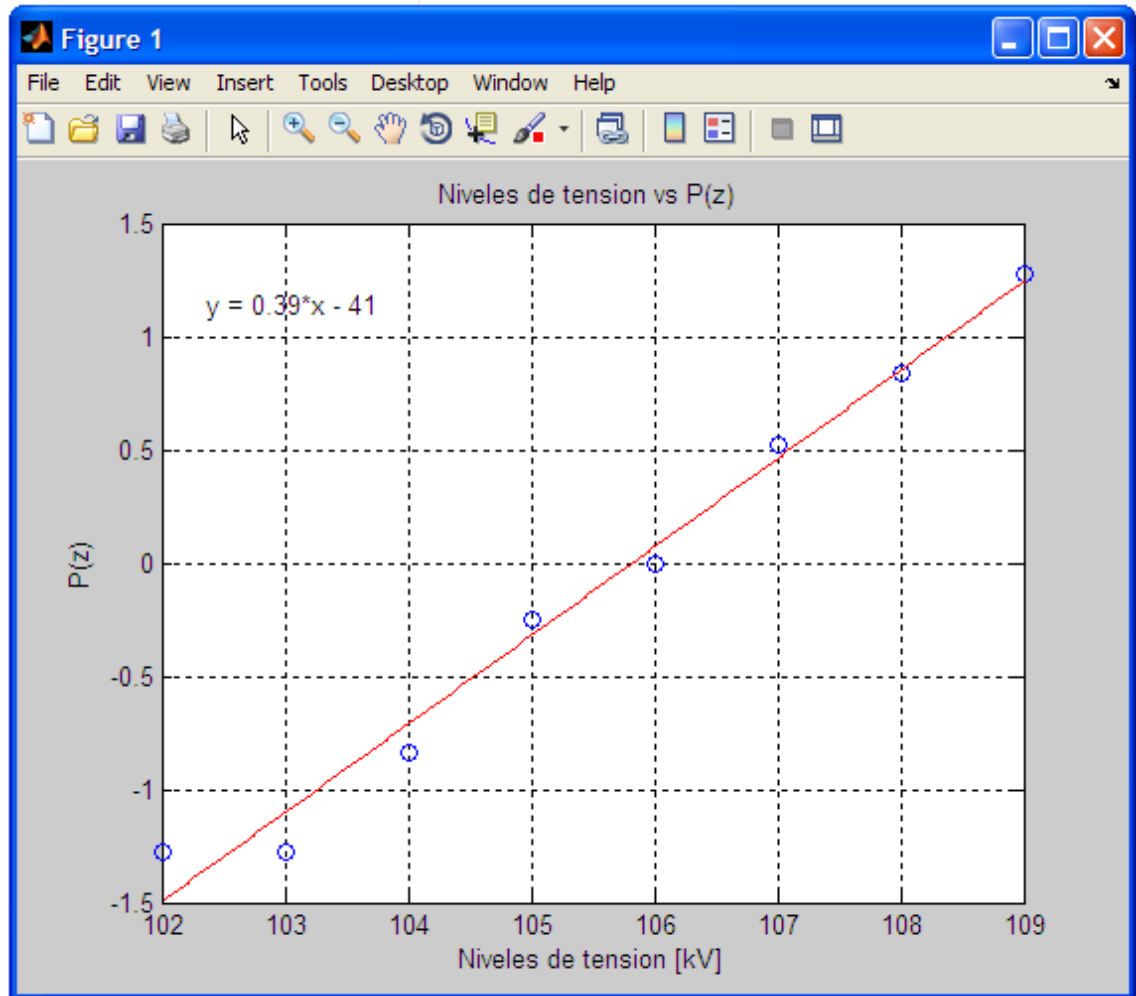
Nivel de tensión (kV)	Probabilidad de descarga (%)	P(z)
102	10	-1,28
103	10	-1,28
104	20	-0,84
105	40	-0,25
106	50	0
107	70	0,52
108	80	0,84
109	90	1,28

Fuente: Autor.

Una vez hecho el cambio de rango de la función, se puede realizar la regresión lineal para estimar una ecuación que defina la tensión en función de la probabilidad de que esta genere una descarga en términos de la variable **z**.

Con la ayuda de MATLAB se realizó esta regresión y se tiene que:

Figura 10. Regresión lineal para los datos de la tabla 3.



Fuente: Autor.

$$z = 0,39V - 41 \quad (3.5)$$

Luego para determinar la tensión con probabilidad del 50% de generar descarga, según la tabla de la figura 9, para una probabilidad del 50% o 0,5 el valor de z es cero. Evaluando en la ecuación 3.5, se tiene que:

$$0 = 0,39V_{50\%} - 41$$

Por lo tanto

$$V_{50\%} = \frac{41}{0,39} = 105,12 \text{ kV}$$

Es decir, para los resultados de la metodología de niveles múltiples del esquema de la figura 6, la tensión de chispa $V_{50\%}$ corresponde a:

$$V_{50\%} = 105,12 \text{ kV}$$

3.2 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE ACUERDO AL MÉTODO DE DIXON Y MOOD.

Este método permite calcular la tensión de chispa a partir de los datos obtenidos durante las pruebas Up and Down. Consiste en tomar el número de eventos de menor ocurrencia ya sean chispas(X) o soportes(O) y con base en ellos, calcular la tensión de chispa utilizando la siguiente expresión:

$$V_{50\%} = \frac{\sum n_v V_v}{n_v} \pm \frac{\Delta V}{2} \quad (3.6)$$

En donde:

n_v : es el número menos frecuente entre los eventos (soporte ó chispa), en cada nivel de tensión.

V_v : es la tensión en cada nivel.

ΔV corresponde a la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{V_f - V_i}{m - 1} \quad (3.7)$$

Donde:

V_f : tensión en el nivel más alto.

V_i : tensión en el nivel más bajo.

m : número de niveles utilizados en el ensayo.

El signo para el $\Delta V \pm$ es positivo, si se utilizan los soportes(O), y negativo si por el contrario, se trabajan con los flámeos(X).

El método Dixon y Mood permite conocer simultáneamente un estimativo de la desviación estándar, siempre y cuando los datos estén normalmente distribuidos, lo cual es una ventaja que presenta este método frente a otros. La desviación estándar se calcula como:

$$\sigma = \frac{1,62}{\Delta V} \left[\frac{\sum n_v V_v^2 - \frac{(\sum n_v V_v)^2}{\sum n_v}}{\sum n_v} \right] + 0,047\Delta V \quad (3.8)$$

A continuación se presenta un ejemplo con los datos obtenidos en el esquema de la figura 4 para la metodología up and Down.

Tabla 4. Resultados para las pruebas del esquema de la figura 4 según la metodología Up and Down.

Nivel de tensión (kV)	Chispas (X)	Soportes(O)
155	1	0
150	4	2
145	3	5
140	1	3
135	0	1
Total chispas y soportes	9	11

Fuente: Autor.

Inicialmente se calcula el ΔV y por trabajar con las chispas su signo será negativo. Se utiliza la ecuación 3.6, entonces:

$$\Delta V = \frac{155 - 135}{5 - 1}$$

$$\Delta V = 5 \text{ kV}$$

Se toma el evento de menor ocurrencia, en este caso las chispas y se calcula la tensión de chispa $V_{50\%}$ por medio de la ecuación 3.5.

$$V_{50\%} = \frac{(155 * 1) + (150 * 4) + (145 * 3) + (140 * 1) + (135 * 0)}{9} - \frac{5}{2}$$

$$V_{50\%} = 145,3 \text{ kV}$$

A continuación se calcula la desviación estándar según la ecuación 3.7

Por términos de la ecuación para facilitar los cálculos se tiene:

$$\begin{aligned} \sum n_v V_v^2 &= (155^2 * 1) + (150^2 * 4) + (145^2 * 3) + (140^2 * 1) + (135^2 * 0) \\ &= 196\,700 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\sum n_v V_v)^2 &= [(155 * 1) + (150 * 4) + (145 * 3) + (140 * 1) + (135 * 0)]^2 \\ &= 1\,768\,900 \end{aligned}$$

$$\sum n_v = 9$$

$$\sigma = \frac{1,62}{5} \left[\frac{196\,700 - \frac{1\,768\,900}{9}}{9} \right] + 0,047 * 5$$

$$\sigma = 5,83 \text{ kV}$$

Al comparar los resultados de la tensión de chispa obtenidos por los métodos de la norma IEEE std 4 de 1995 y Dixon y Mood, se observa que los resultados no difieren en forma considerable, ver tabla 5, por lo que el procedimiento de Dixon y Mood es una alternativa interesante para el tratamiento de datos al implementar la metodología Up and Down.

Tabla 5. Resultados de la tensión de chipa para las pruebas del esquema de la figura 4 según la norma IEEE std 4 de 1995 y Dixon y Mood.

Método	Tensión de chispa V _{50%} (kV)
Norma IEEE std 4 de 1995	145,5
Dixon y Mood	145,3
ERROR (%)	0,13%

Fuente: Autor.

4. CORRECCIÓN POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE LA TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$

Las condiciones atmosféricas (densidad de aire, humedad, presión, etc.) afectan la tensión de chispa de un aislamiento. Según Paschen, para campos uniformes y con pequeñas separaciones entre electrodos, la tensión de descarga es función de la presión y la distancia de separación entre electrodos.

Esto significa que la tensión de descarga o chispa en un campo uniforme es únicamente función del producto de la presión y la distancia de separación entre electrodos para un gas en particular y un material dado para los electrodos. Generalmente la tensión de chispa para una configuración que utilice al aire como aislamiento, se incrementa por el aumento de la densidad del aire o la humedad, ya que la densidad del aire reduce la trayectoria libre media de los electrones, mientras que la humedad reduce la movilidad de estos al ser capturados por las moléculas de agua. Las tensiones de chispa debidas a impulsos de tensión tienen una relación directa con la densidad del aire y por lo tanto con la presión atmosférica.

Esto quiere decir que los resultados obtenidos durante las pruebas con ciertas condiciones atmosféricas, difieren para condiciones atmosféricas diferentes, entonces, para evitar realizar pruebas para cada caso particular de ubicación geográfica, se realizan las pruebas en un laboratorio y posteriormente se corrigen según las condiciones del lugar.

Como ya se mencionó, la presión y la temperatura varían considerablemente dependiendo del lugar y el tiempo, las características en la tensión de chispa para diferentes aparatos y dispositivos se verán afectadas por estos parámetros, por esta razón, estos parámetros fueron estandarizados y se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Condiciones atmosféricas estandarizadas.

CONDICIÓN ATMOSFÉRICA	REPRESENTACIÓN	VALOR
Temperatura [°C]	t_0	20
Presión [mm Hg]	p_0	760
Humedad absoluta[g/m ³]	h_0	11

Fuente: Norma IEEE std 4 de 1995.

La norma IEEE std 4 de 1995 establece dos procedimientos de corrección de la tensión de chispa dependiendo de la distancia interelectrónica de la prueba, ya sea para distancias mayores o menores de un metro (1 m) de separación, debido a que como se mencionó en el capítulo 1, se presentan fenómenos diferentes en el proceso de descarga según la separación interelectrónica, es decir, para distancias menores a un metro de separación, la descarga se desarrolla a través del fenómeno denominado **streamer** y para distancias de separación mayores a un metro, aparte del streamer se presentan también los **canales**, lo cual hace que la característica de la descarga y por lo tanto de la tensión de chispa sean diferentes.

A continuación se detallarán los procedimientos de corrección por condiciones atmosféricas para distancias mayores y menores a un metro según la norma IEEE std 4 de 1995 y su adición del 2001 (IEEE std 4a de 2001).

4.1 PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS PARA DISTANCIAS DE SEPARACIÓN MAYORES A UN METRO SEGÚN LA NORMA IEEE STD 4 DE 1995.

En la norma IEEE std 4 de 1995 se establecen dos factores de corrección:

- ❖ Factor de corrección por la densidad del aire (k_1)
- ❖ Factor de corrección por humedad (k_2)

Tal que:

$$(V_{50\%})_0 = \frac{V_{50\%}}{k_1 k_2} \quad (4.1)$$

Donde:

$(V_{50\%})_0$: Tensión de chispa a condiciones normalizadas.

$V_{50\%}$: Tensión a condiciones de laboratorio.

4.1.1 Factor de corrección por densidad del aire (k_1).

El factor de corrección por densidad de aire se define como:

$$k_1 = \delta^m \quad (4.2)$$

$$\delta = \left(\frac{p}{p_0}\right) \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right) \quad (4.3)$$

Donde:

δ : Densidad relativa del aire.

p : Presión en mm Hg a condiciones de laboratorio.

Para medir la presión se utiliza un barómetro de mercurio en el momento del ensayo.

p_0 : Presión normalizada.

t : Temperatura en grados Celsius a condiciones de laboratorio.

Para medir la temperatura se utiliza un termómetro.

t_0 : Temperatura normalizada.

m : coeficiente que será especificado más adelante.

4.1.2 Factor de corrección por humedad (k_2).

Asumiendo una densidad constante para el aire, este factor se utiliza para corregir una tensión de chispa a cualquier nivel de humedad h , a su valor normalizado. El factor de corrección por humedad se define como:

$$k_2 = k^w \quad (4.4)$$

Donde:

k : parámetro que depende del tipo de tensión aplicado en la prueba y que puede ser obtenido aproximadamente como función de la relación (h/δ) entre la humedad absoluta (h) y la densidad relativa del aire (δ), utilizando las curvas de la figura 12.

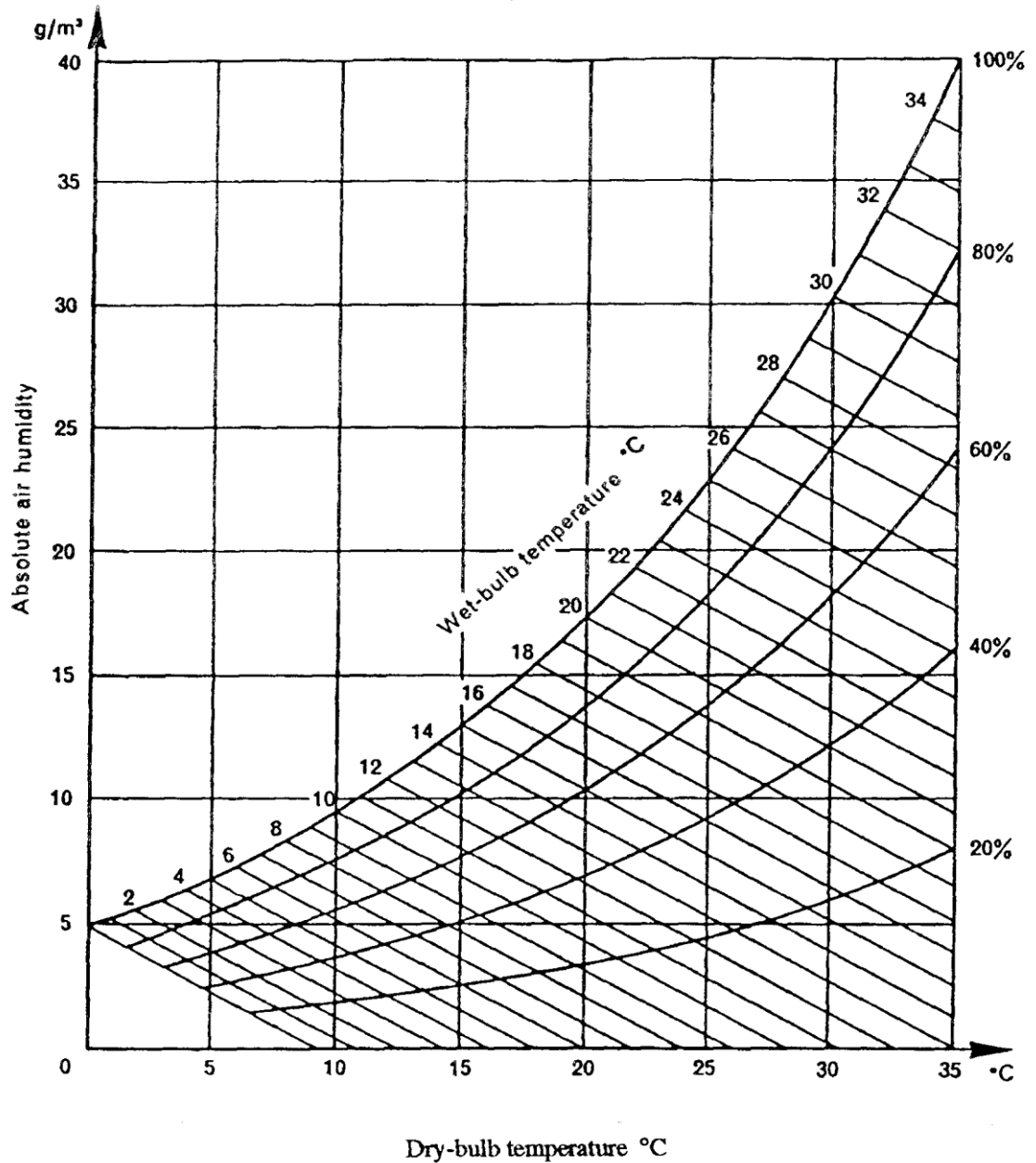
w : coeficiente que será especificado más adelante.

La medición del parámetro h (humedad absoluta) se realiza generalmente por medio de un sicrómetro, este dispositivo consta de dos termómetros de alta precisión, uno de ellos de bulbo seco y el otro de bulbo húmedo. La humedad relativa y absoluta puede determinarse a partir de las lecturas de estos dos termómetros utilizando las curvas termodinámicas mostradas en la figura 11.

Es importante garantizar un flujo de aire adecuado al sicrómetro de una velocidad entre 4 m/s y 10 m/s y tomar rápida y cuidadosamente las lecturas

de los termómetros en el instante adecuado, esto para evitar errores excesivos en la determinación de las temperaturas de los dos bulbos y así minimizar errores en la estimación de la humedad relativa ó absoluta.

Figura 11. Curvas para determinar humedad absoluta y relativa.



Fuente: Norma IEEE std 4 de 1995.

Alternativamente la humedad absoluta se puede obtener a partir de la estimación de la humedad relativa por medio de la siguiente expresión:

$$h = (CVH_2O) * \frac{h_r\%}{100} \quad (4.5)$$

Donde:

h : Humedad absoluta.

$h_r\%$: Humedad relativa.

CVH_2O : es el contenido de vapor de agua del aire saturado en g/m^3 .

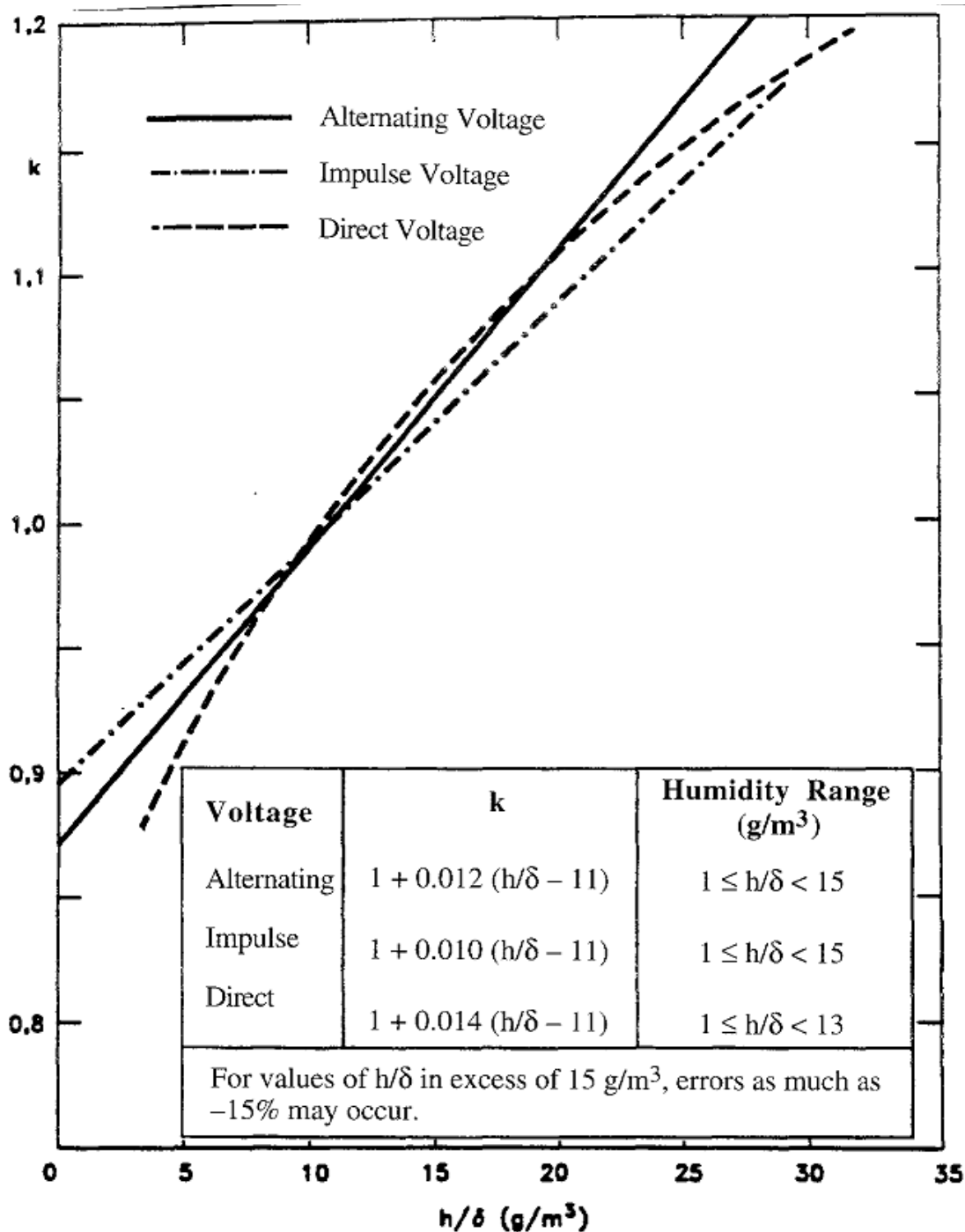
A continuación en la tabla 7 se presenta el contenido de vapor de agua del aire saturado (CVH_2O), en función de algunas temperaturas.

Tabla 7. Contenido de vapor de agua del aire saturado en función de la temperatura.

Temperatura (°C)	Contenido de vapor de agua del aire saturado(g/m^3)
-10	2,1
0	4,8
10	9,4
20	17,33
21	17,7
22	19
23	20
24	21,3
25	22,67
26	23,67
27	25
28	26,67
29	28,33
30	30,33
31	31,67
32	32,67

Fuente: Rugeles, Julio. Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión. 2ª edición. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1991.

Figura 12. k en función de (h/δ).



Fuente: Norma IEEE std 4 de 1995.

Una vez determinada la humedad absoluta y de acuerdo a la relación (h/δ) de la figura 12, para tensiones tipo impulso, puede expresarse la constante k utilizando la curva correspondiente ó la siguiente relación:

$$k = 1 + 0,01 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (4.6)$$

Para tensiones tipo alterna, la constante k puede expresarse en función de la relación (h/δ) como:

$$k = 1 + 0,012 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (4.7)$$

Para tensiones continuas, la constante k puede expresarse en función de la relación (h/δ) como:

$$k = 1 + 0,014 \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (4.8)$$

En donde según la norma IEEE std de 1995, para valores de h/δ por encima de 15 g/m^3 se pueden presentar errores hasta de -15%.

Coeficientes m y w

Para calcular los coeficientes m y w , aparece el parámetro adimensional g , el cual recoge información acerca del tipo de predescarga y se define como:

$$g = \frac{V_B}{500 * L * \delta * k} = \frac{(V_B)_0}{500 * L} \quad (4.9)$$

Donde:

V_B : Es la tensión de descarga disruptiva del 50% (medido o estimado) a las condiciones atmosféricas actuales. En los casos que este no pueda estimarse se asume de 1,1 veces el voltaje de prueba. Este voltaje se da en kilovoltios.

L : Distancia mínima de descarga, se da en metros.

δ : Es la densidad relativa del aire.

k : Parámetro definido en el factor de corrección por humedad. Ver figura 12.

$(V_B)_0 = \frac{V_B}{\delta k}$: Es la tensión de descarga disruptiva del 50% (medida o estimada) a las condiciones atmosféricas normalizadas de acuerdo a los coeficientes k y δ .

Los coeficientes m y w solo dependen del coeficiente g independientemente de la configuración electródica, su separación o la naturaleza del impulso y se detallan en la figura 13.

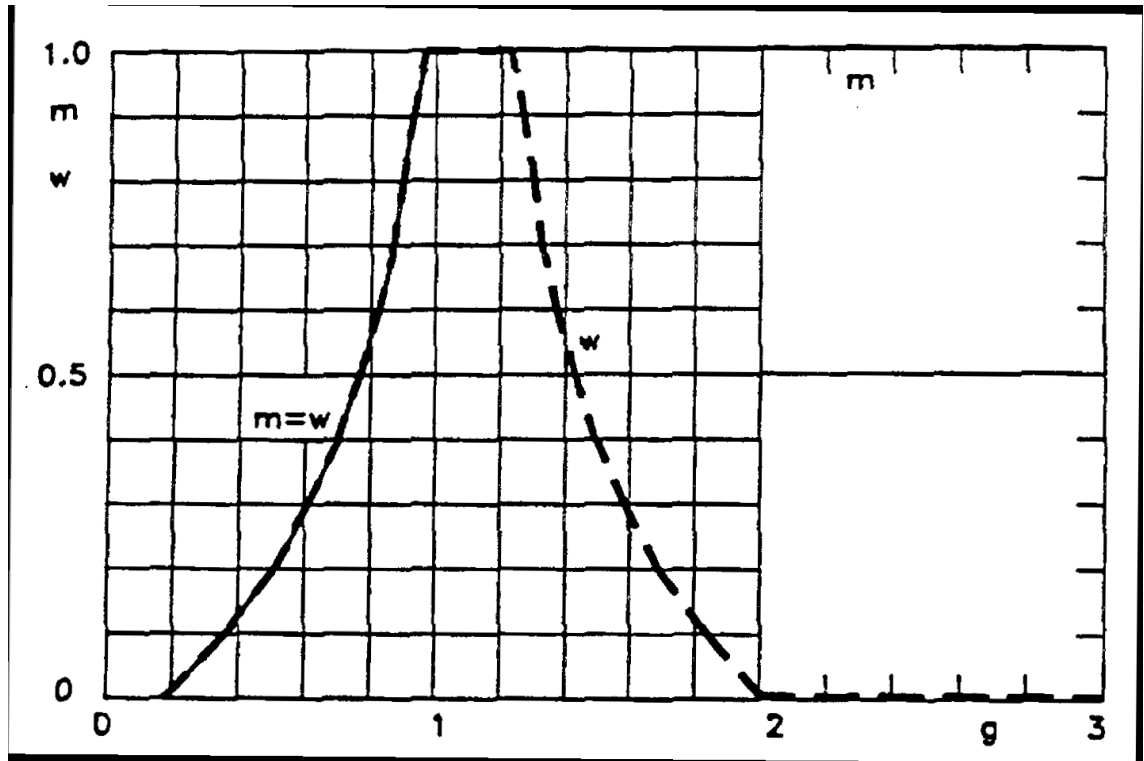
Figura 13. Coeficientes m y w en función del parámetro g .

PARÁMETRO g	INTERVALO
$m = w = \frac{g(g - 0,2)}{0,8}$	$g \leq 0,97$
$w = 1$	$0,97 < g < 1,23$
$w = \frac{(2 - g)}{0,66g}$	$1,23 < g < 2$
$w = 0$	$g \geq 2$
$m = 1$	$g > 0,97$

Fuente: Norma IEEE std 4 de 1995.

Las relaciones entre m y w con respecto a g obtenidas experimentalmente también se muestran en la figura 14.

Figura 14. Coeficientes m y w en función del parámetro g.



Fuente: Norma IEEE std 4 de 1995.

4.2 PROCEDIMIENTO DE CORRECCIÓN POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS PARA DISTANCIAS DE SEPARACIÓN MENORES A UN METRO SEGÚN LA NORMA IEEE STD 4a DE 2001.

Para distancias interelectrónicas menores a un metro, la norma establece que la tensión de chispa normalizada por condiciones ambientales es igual a la tensión de chispa a condiciones de laboratorio por la relación del factor de corrección por humedad elevado a una potencia y el factor de densidad de aire.

Es decir:

$$(V_{50\%})_0 = V_{50\%} \frac{k^w}{\delta} \quad (4.10)$$

En la cual δ es el factor de corrección por densidad del aire y se define como:

$$\delta = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \left(\frac{273 + t_0}{273 + t}\right)^n \quad (4.11)$$

Donde:

p_0 : Presión atmosférica a nivel del mar, 760 mmHg.

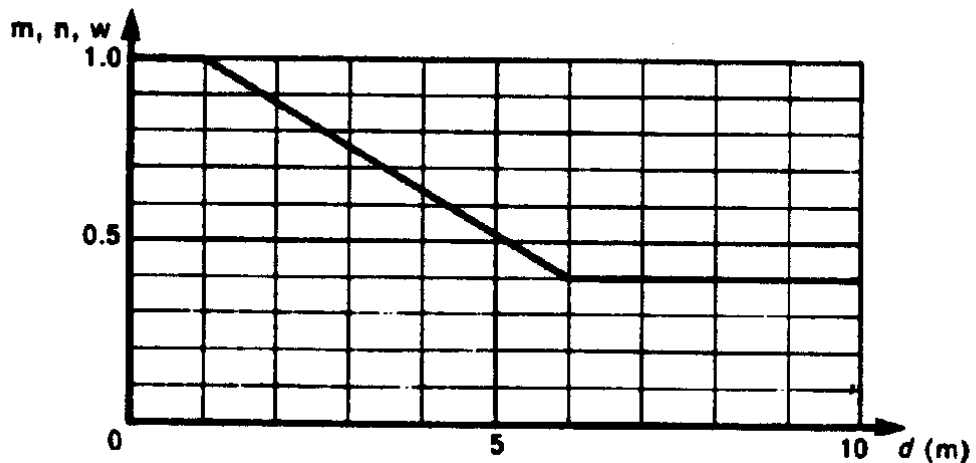
p : Presión atmosférica a condiciones de laboratorio, mmHg.

t_0 : Temperatura a condiciones normales, 20 °C.

t : Temperatura a condiciones de laboratorio, °C.

m y n : coeficiente obtenido de la figura 15. Como se puede observar para distancia de separación menor a un metro, $m=n= 1$.

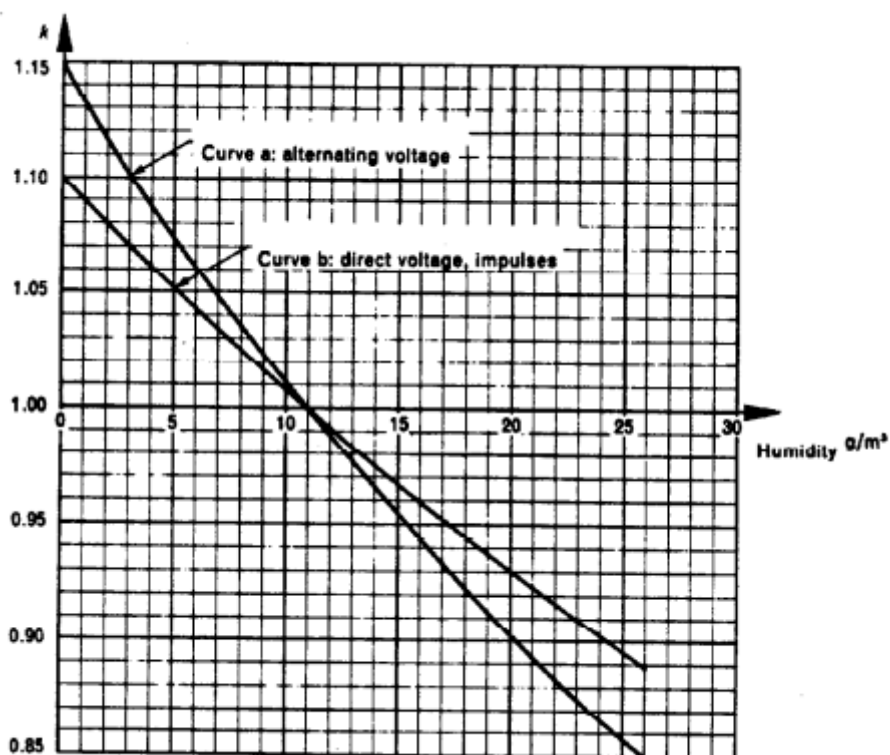
Figura 15. m y n en función de la distancia de separación interelectrónica.



Fuente: Norma IEEE std 4a de 2001.

El factor k es el factor de corrección por humedad y este se halla a partir de la figura 16 la cual está en función de la humedad absoluta.

Figura 16. k en función de la humedad absoluta.



Fuente: Norma IEEE std 4 de 1995.













Curva a: Para tensiones alternas.

Curva b: Para tensiones continuas e impulsos.

En este trabajo de grado se utilizará la curva b ya que se aplicaron impulsos atmosféricos. Las mediciones de la presión, y la temperatura así como la estimación de la humedad absoluta se realizan siguiendo los mismos procedimientos descritos en los numerales 4.1.1 y 4.1.2.

Los exponentes m , n y w dependen de la configuración electrodo (esfera-esfera, punta-punta o punta-placa) y del tipo de tensión aplicada a dicha configuración. Estos coeficientes pueden obtenerse de la figura 17 para cada caso.

Figura 17. Coeficientes m , n y w en función de la configuración electroda y el tipo de tensión aplicada.

Type of test voltage	Electrode form	Polarity	Air density correction	Humidity correction	
			Exponents m and n (see note in 1.3.5.3)	Factor k	Exponent w
Direct voltage		+ -	1.0	See Figure 16 (curve <i>b</i>)	0 0
		+ -			1.0 1.0
		+ -			1.0 0
Alternating Voltage		~	1.0	See Figure 16 (curve <i>a</i>)	0
		~	See Figure 15		See Figure 15
		~	See Figure 15		See Figure 15
Lightning impulse voltage		+ -	1.0	See Figure 16 (curve <i>b</i>)	0 0
		+ -			1.0 0.8
		+ -			1.0 0
Switching impulse voltage		+ -	1.0 1.0	See Figure 16 (curve <i>b</i>)	0 0
		+ -	See Figure 15 ^a		See Figure 15 ^a
		+ -	See Figure 15 ^a		See Figure 15 ^a

^aNo guidance or correction given.

Fuente: Norma IEEE std 4a de 2001.

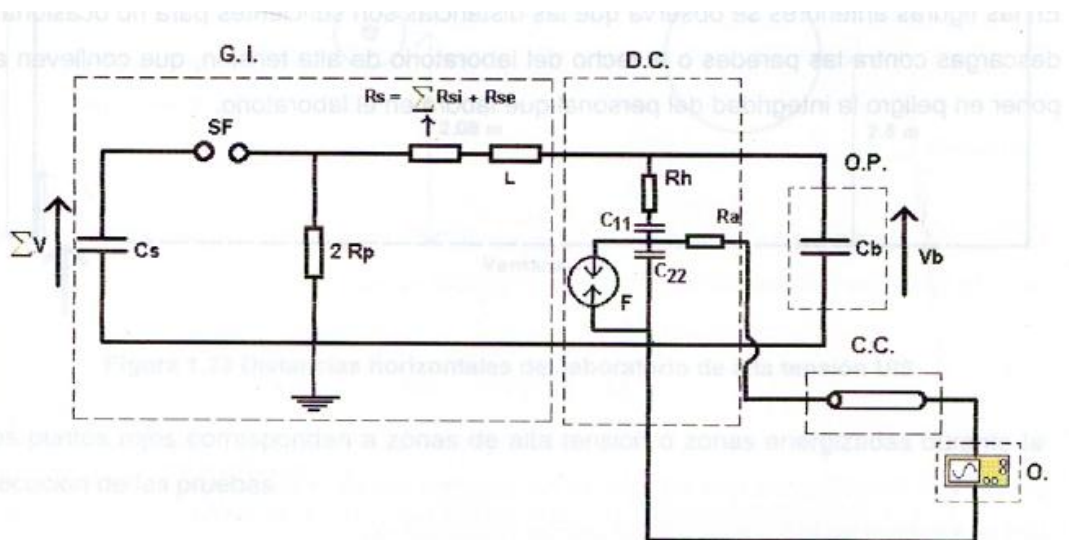
5. TRATAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentará el tratamiento de datos y los resultados para un caso experimental de la obtención de la tensión de chispa $V_{50\%}$ en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander, utilizando la metodología Up and Down descrita en el capítulo 2 y el respectivo tratamiento estadístico de los resultados de esta, descrito en el capítulo 3.

5.1 EQUIPO Y MONTAJE

A continuación se presenta el esquema eléctrico del montaje de equipos necesario para la generación del impulso atmosférico y su sistema de medida en el laboratorio de alta tensión de la UIS.

Figura 18. Circuito de prueba y medida.



Fuente: Tesis de maestría. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta –punta y punta-placa. CASTELLANOS, Henry D.

Donde:

G.I.: Generador de Impulsos.

D.C.: Divisor Capacitivo.

O.P.: Objeto de prueba.

C.C.: Cable Coaxial.

O.: Osciloscopio digital.

C_s: Grupo de capacitores del generador de impulsos.

SF. : Electroodos o gaps.

R_p: Resistencia paralelo de la cola.

R_s: Resistencia serie del frente.

R_{si} : Resistencia interna en serie.

R_{se} : Resistencia externa en serie (esterilla).

L.: Inductancia serie del generador de impulsos.

R_h: Resistencia de amortiguamiento.

C₁₁ : Capacitancia de alto voltaje.

C₂₂ : Capacitancia de Bajo voltaje.

R_a : Resistencia del terminal de acople.

C_b: Objeto de prueba (Sistema de electroodos).

Este esquema está conformado por tres grandes elementos que son: el generador de impulsos, divisor capacitivo y el osciloscopio para mediciones.

5.1.1 Sistema Generador de Impulsos.

El generador de impulsos es un dispositivo que genera intencionalmente transitorios de alto nivel de tensión para simular sobretensiones tipo atmosférico y de maniobra. Su aplicación principal es la realización de pruebas de aislamiento (prueba de impulso) en equipos tales como seccionadores, transformadores, DPS, etc. O para determinar las características de respuesta de los cortacircuitadores. El generador realiza básicamente dos operaciones que son, almacenar la energía de generación de la onda de impulso y descargarla sobre el objeto de prueba. Con este dispositivo pueden modelarse las ondas tipo impulso normalizadas que son, la onda 1,2/50 μ s para impulso atmosférico descrito en el capítulo 1 y la onda 250/2500 μ s para impulso maniobra.

El generador de impulsos disponible en el laboratorio de alta tensión de la UIS es un generador de impulsos marca HAEFELY SGS 800/20, con este se pueden obtener ondas de impulso que pueden alcanzar amplitudes entre los 10 kV y los 800 kV, con una energía almacenada de hasta 20 kJ. Es un equipo modular que consta de 8 etapas, conformada cada una por una resistencia en serie, una en paralelo, un dual de condensadores y una configuración de electrodos esféricos. Cada una de estas etapas puede generar hasta 100 kV y almacenar hasta 2,5 kJ.

Este sistema generador está compuesto por tres dispositivos importantes que son.

- **Consola de mando tipo GC 222:** Este dispositivo permite controlar manual o automáticamente todo el proceso de carga, descarga y disparo de la onda de impulso y opera directamente el sistema de seguridad y otros elementos de medida.

Figura 19. Consola de mando tipo GC 222.



Fuente: Autor.

- **Unidad de carga tipo LGR 100/15:** Esta unidad está diseñada para operar en coordinación con la unidad de control y el generador de impulso, en un sistema de tensión de impulso serie S. La alimentación del sistema generador proveniente del circuito de potencia entra por esta unidad, la cual está conformada esencialmente por un transformador elevador de alta tensión (220 V/50 kV 3 kVA), un condensador de acople, un sistema de tiristores reguladores de carga, un circuito CD rectificador y doblador de la tensión de carga y una resistencia de amortiguamiento. La unidad es móvil, no encapsulada para operar en interiores. Ver figura 20.
- **Generador de impulsos:** Conformado básicamente por un conjunto de resistencias y condensadores; estos últimos al descargarse generan el impulso pleno a través de una resistencia de esterilla conectada a la salida. Ver figura 21.

Figura 20. Unidad de carga tipo LGR 100/15.



Fuente: Autor.

Figura 21. Generador de impulsos tipo SGS 800/20.



Fuente: Autor.

Las características técnicas para este generador se resumen en la tabla 8.

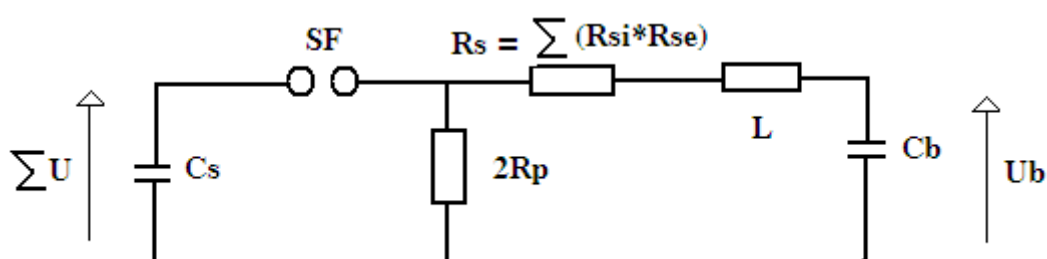
Tabla 8. Características técnicas del generador de impulso tipo SGS 800/20.

Máxima energía por etapa [KJ]		2,5
Capacitancia por etapa [nF]		500 ± 5%
Rata máxima de repetición del impulso por minuto		2
Inductancia por etapa [μH]		≈2,5
Voltaje máximo por etapa [KV] (0≤h≤1000m)		100
Eficiencia para C _s /C _b	IA	86 – 94%
	IM	83 – 90%
Resistencias R _p (Ω)	IA	138
	IM	9,6 k
Resistencias R _s (Ω)	IA	20
	IM	20
Resistencias R _{se} (Ω)	IA	610
	IM	75 k
Entrehierro [mm]		41
Impulso del trigger para la unidad de carga [V]		+200
Altura [m]		3,27

Fuente: Emil Haefely Co. Ltd. Catalog of impulse voltage test system. Serie S, 1991.

El circuito equivalente del generador de impulsos de tensión es el mostrado en la figura 22.

Figura 22. Circuito equivalente para el generador de impulso tipo SGS 800/20.



Fuente: Tesis de maestría. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta –punta y punta-placa. CASTELLANOS, Henry D.

5.1.2 Divisor Capacitivo.

La función de este dispositivo es la de permitir a través de un método indirecto medir la magnitud de la tensión producida por el GI, sin distorsionar la forma de onda, de tal forma que pueda ser medida por el osciloscopio, es decir, el divisor capacitivo permite observar y medir a escala la onda de impulso a la cual se somete el objeto de prueba, garantizando una relación precisa y una mínima deformación.

El divisor capacitivo consiste eléctricamente en un circuito RC y mecánicamente consta de base puesta sobre rodillos con una mesa central de aislamiento. La base sostiene la sección de alta tensión, la cual está formada por una columna de tres condensadores, cada uno de 2000 pF y una resistencia de amortiguamiento de 100 ohmios. La sección de baja tensión está sostenida de la mesa de aislamiento, es de fácil maniobra y consiste en un arreglo de condensadores en paralelo. En el extremo de la sección de baja tensión, esta la salida para el cable coaxial del osciloscopio y sobre la cubierta metálica de esta sección se halla el tornillo de puesta a tierra del divisor.

El divisor de tensión disponible en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander es de marca Haefely de tres etapas, compensado a la entrada con unidades de resistencias conectadas en serie con las capacitancias para evitar la presencia de oscilaciones. El divisor posee una relación $720,5:1$ para la medición de la tensión de salida, es decir, este dispositivo recibe una onda impulso de tensión y la envía reducida 720,5 veces mediante un cable coaxial al osciloscopio.

En la tabla 9 se presentan algunas características del divisor capacitivo.

Figura 23. Divisor capacitivo marca Haefely.



Fuente: Autor.

Tabla 9. Características técnicas del divisor capacitivo HAEFELY tipo CS 100.

Tensión máxima de medida, [kV]	IA (+)	1200
	IM (+)	900
Relación		720,5:1
Capacitancia unidad AT, [pF]		652,3
Capacitancia unidad AT, [nF]		468
Terminal de acople, [Ω]		75
Resistencia de amortiguamiento [Ω]		100 \pm 10%
Tiempo de respuesta [nS]		<100
Altura [m]		3,5

Fuente: Emil Haefely Co. Ltd. Catalog of impulse voltage test system. Serie S, 1991.

5.1.3 Osciloscopio.

Este instrumento recibe la señal del divisor capacitivo durante las pruebas, el osciloscopio disponible en el laboratorio de alta tensión es marca Fluke 105 series II 100 MHz. Entre las características de este dispositivo se encuentran:

- Osciloscopio digital.
- Multímetro digital (DMM) de 100 MHz, con lectura de 3 2/3 dígitos.
- Menú de medición para una configuración rápida.
- Función auto-set continuo para medir señales mediante sonda con manos libres.
- Gran capacidad de memoria para configuraciones del panel frontal, formas de onda y pantallas.
- Puerto de interface óptica RS-232, aislamiento 600 V.
- Tecla de información instantánea.

Las entradas máximas en cada punta (BNC) son las siguientes:

- Máxima tensión de la señal de entrada: 300 V eficaces (rms) en entrada directa.
- Máxima tensión de la señal de entrada: 600 V eficaces (rms) cuando se utiliza la sonda 10:1.
- Tensión de masa: 600 V eficaces (rms).
- La impedancia de entrada es de 10 M Ω /15 pF con sonda 10:1.
- Capacidad de almacenamiento de 30 memorias (30 diferentes formas de onda).
- Capacidad de conexión mediante una interface óptica a un PC o impresora.

Figura 24. Osciloscopio digital marca Fluke.



Fuente: Autor.

5.1.4 Objeto de prueba.

De acuerdo a los objetivos de este trabajo, la configuración electródica de prueba es el sistema **punta-placa** ya que a partir de esta y el factor electrogeométrico, pueden obtenerse los resultados equivalentes para otras configuraciones (capítulo 1).

El electrodo utilizado como punta es el estandarizado por la norma IEC. Para esta configuración se utilizó un electrodo de acero de 22,22 mm de lado y sección cuadrada, con extremo en ángulo recto ver figura 25.

Para el diseño de la placa o electrodo aterrizado, se tuvo en cuenta el efecto del borde de la placa sobre la perpendicularidad de la descarga. Teóricamente, la longitud de la placa debe ser “infinita” para que la caída de la descarga sea vertical, en la práctica se simula la longitud infinita de acuerdo al radio de la placa. En la referencia [8] expone que la relación entre el radio de la placa y la

distancia de separación de los electrodos, debe ser mayor o igual a 0,75, es decir:

$$\frac{R}{d} \geq 0,75$$

Donde:

R: corresponde al radio de la placa.

D: distancia de separación entre electrodos.

El electrodo placa utilizado en las pruebas para este trabajo de grado, fue una lámina de aluminio de diámetro 1,5 m, la cual está disponible en el laboratorio de alta tensión.

Figura 25. Configuración electroda punta-placa.



Fuente: Autor.

A continuación se presenta el montaje final de los electrodos teniendo en cuenta las especificaciones de seguridad requeridas para este tipo de pruebas descritas en la referencia [Ref 8].

Figura 26. Montaje de los electrodos punta-placa.



Fuente: Autor.

5.2 TRATAMIENTO DE DATOS Y RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente la configuración utilizada para el caso experimental realizado en este proyecto y que busca servir como ejemplo en la aplicación de los procedimientos detallados en los capítulos anteriores fue la configuración punta-placa.

La distancia de separación interelectródica para las pruebas fue de 60 cm para configuración punta-placa y con una eficiencia del generador de impulsos del 93%.

Las condiciones atmosféricas durante la aplicación de las pruebas se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 10. Condiciones atmosféricas del laboratorio durante las pruebas.

CONDICIONES ATMOSFÉRICAS LABORATORIO	VALOR
Temperatura [°C]	25,6
Presión atmosférica [mm Hg]	680
Humedad relativa [%]	66

Fuente: Autor.

Para los cálculos de normalización y tensión de chispa de esta prueba, se utilizó el programa diseñado en este trabajo de grado por el autor, llamado V50UD, el cual permite calcular la tensión de chispa a condiciones de laboratorio y normalizada según los procedimientos descritos por la norma IEEE y el propuesto por Dixon y Mood. En los anexos se presenta el código de programación del V50UD y su respectivo manual de usuario.

5.2.1 Aplicación de la metodología Up and Down para determinar la tensión de chispa $V_{50\%}$

Como se especificó en el capítulo 2, inicialmente debe realizarse una estimación de la tensión de chispa esperada para la configuración eléctrica y su respectiva distancia de separación, se propuso entonces según la configuración electroica, punta-punta o punta-placa, una expresión que permite una estimación de esta tensión de chispa esperada basados en los resultados obtenidos anteriormente en pruebas similares realizadas en el laboratorio de alta tensión de la UIS y que fueron registradas en las referencias [2, 3 y 8]. Cabe recordar que la estimación de la tensión de chispa permite

establecer el primer nivel de tensión aplicado (tensión inicial) y los pasos de tensión (ΔV). Estos dos parámetros son de suma importancia durante la realización de las pruebas porque como se explicó anteriormente de ellos depende la confiabilidad de los resultados y el ahorro de tiempo, energía y dinero.

A continuación se describirá el procedimiento utilizado para la obtención de estas expresiones de la tensión de chispa en función de la distancia interelectródica.

Para obtener estas expresiones se tomaron los resultados obtenidos para las pruebas realizadas previamente [Ref 2,6y 10]. Estos resultados obtenidos de tensión de chispa para diferentes distancias interelectródicas (menores a un metro) fueron normalizados utilizando los procedimientos expuestos en la adición IEEE std 4a del 2001 a la norma IEEE std 4 de 1995 donde se estipulan los procedimientos de corrección por condiciones atmosféricas para distancias menores a un metro de separación interelectródica. Posteriormente, por medio de una regresión lineal de estos valores de tensión normalizados en función de la distancia de separación pudieron determinarse dichas expresiones para las configuraciones ya mencionadas¹.

Por lo tanto, para:

➤ **Configuración punta-punta**

De las referencias [2 y 3].

Tabla 11. Resultados obtenidos anteriormente para configuración punta-punta.

Distancia de separación [cm]	Tensión de chispa $V_{50\%}$ [kV]	Temperatura [°C]	Presión atmosférica [mm Hg]	Humedad relativa [%]
10	74,70	26,2	680	75.8
15	110,84	26,5	680	73
20	143,56	27	680	76

¹ La publicación de esta adición a la norma IEEE std 4 de 1995 fue posterior a la realización de las pruebas realizadas en ese entonces.

25	197,18	29	680	72
30	219,38	29	680	67.9
35	249,65	29	680	64
40	266,72	29,5	680	63.4
45	289,21	28,5	680	69.9
50	312,98	26	680	76
60	370,01	27	680	80
70	409,97	27	680	78

Fuente: Referencias [2 y 3].

Se procede a realizar la normalización de los valores la tensión de chispa según el procedimiento descrito en la adición IEEE std 4a de 2001 (capítulo 4) para distancias de separación inferiores a un metro, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas presentes en el instante de la prueba en ese momento.

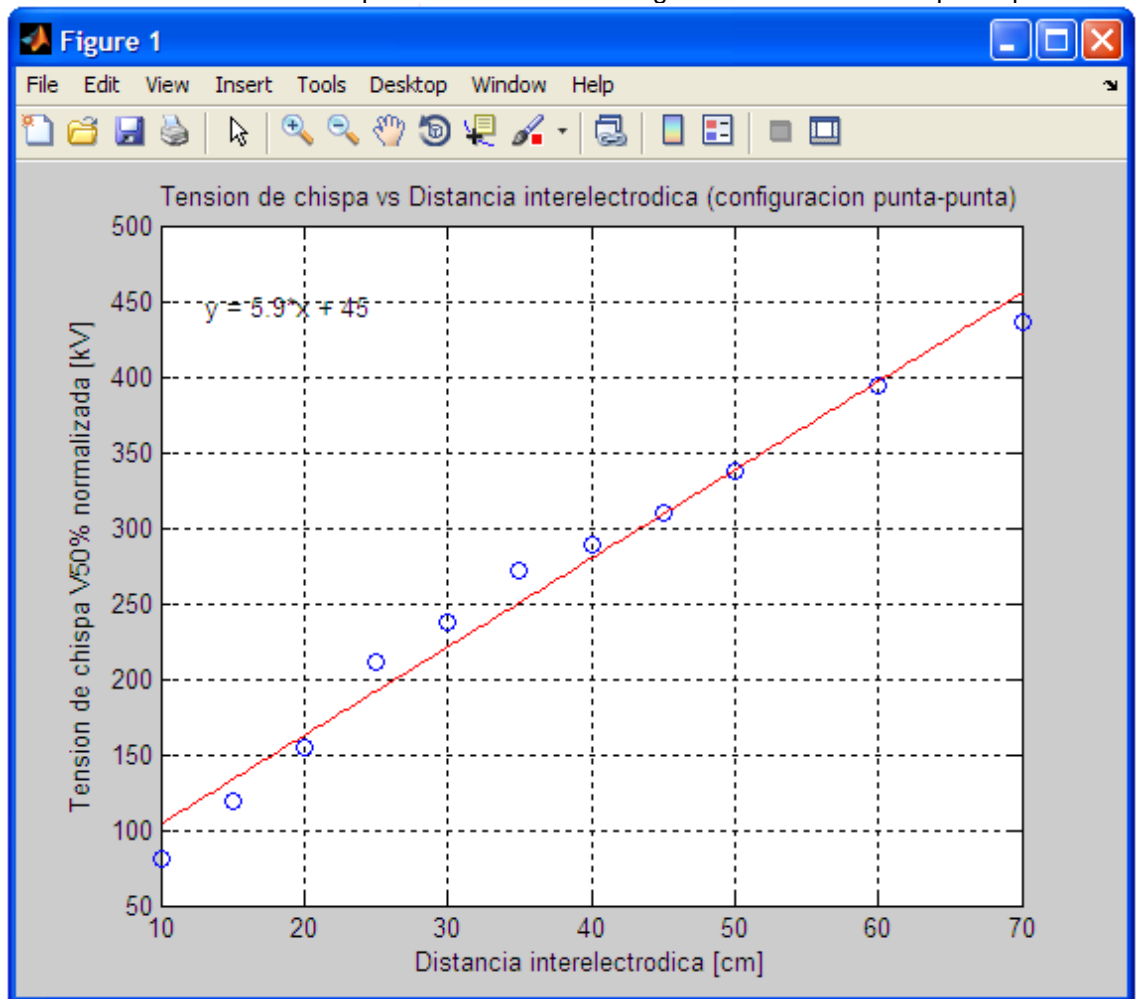
Tabla 12. Normalización de los resultados de la tensión de chispa para configuración punta-punta.

Distancia de separación [cm]	Tensión de chispa $V_{50\%}$ [kV]	Tensión de chispa $V_{50\%}$ normalizada[kV]
10	74,70	80,5
15	110,84	119,6
20	143,56	154,4
25	197,18	211,2
30	219,38	237,5
35	249,65	271,7
40	266,72	289,2
45	289,21	309,3
50	312,98	337,3
60	370,01	393,7
70	409,97	436,3

Fuente: Autor.

Con la ayuda de MATLAB se realizó la regresión lineal para los valores de tensión de chispa a condiciones normalizadas en función de la distancia de separación, esto se hace graficando los puntos correspondientes de tensión de chispa a la respectiva distancia de separación, Se tiene:

Figura 27. Regresión lineal de la tensión de chispa vs distancia de separación interelectrónica para configuración punta-punta.



Fuente: Autor.

De esta regresión se obtiene la siguiente expresión:

$$V_{50\%} = 45 + 5,9d \quad (5.1)$$

Con d en centímetros, $V_{50\%}$ en kV y a condiciones normalizadas.

Expresión que permite realizar una estimación de la tensión de chispa en función de la distancia interelectródica para configuración punta-punta a condiciones normalizadas.

➤ **Configuración punta-placa**

Siguiendo el mismo procedimiento utilizando para la configuración punta-punta, se determina una expresión para la tensión de chispa en función de la distancia de separación interelectródica que permita realizar una estimación de dicha tensión para la configuración punta-placa.

De las referencias [2 y 8] se tiene que:

Tabla 13. Resultados obtenidos anteriormente para configuración punta-placa.

Distancia de separación [cm]	Tensión de chispa $V_{50\%}$ [kV]	Temperatura [°C]	Presión atmosférica [mm Hg]	Humedad relativa [%]
15	103,37	29	680	65
20	136,09	28	680	71,4
30	167,92	28,8	680	68,7
35	186,74	27,2	680	76
40	209,54	27,2	680	76
45	227,89	27,5	680	70,5
50	244,24	27	680	75,8
50,4	248,89	27	680	70
60	292,46	28,8	680	70
70	347,20	26,5	680	80
80	383,03	27	680	70
85	405,52	27	680	72

Fuente: Referencias [2 y 8].

Aplicando el mismo procedimiento utilizado para la configuración punta-punta, se tiene:

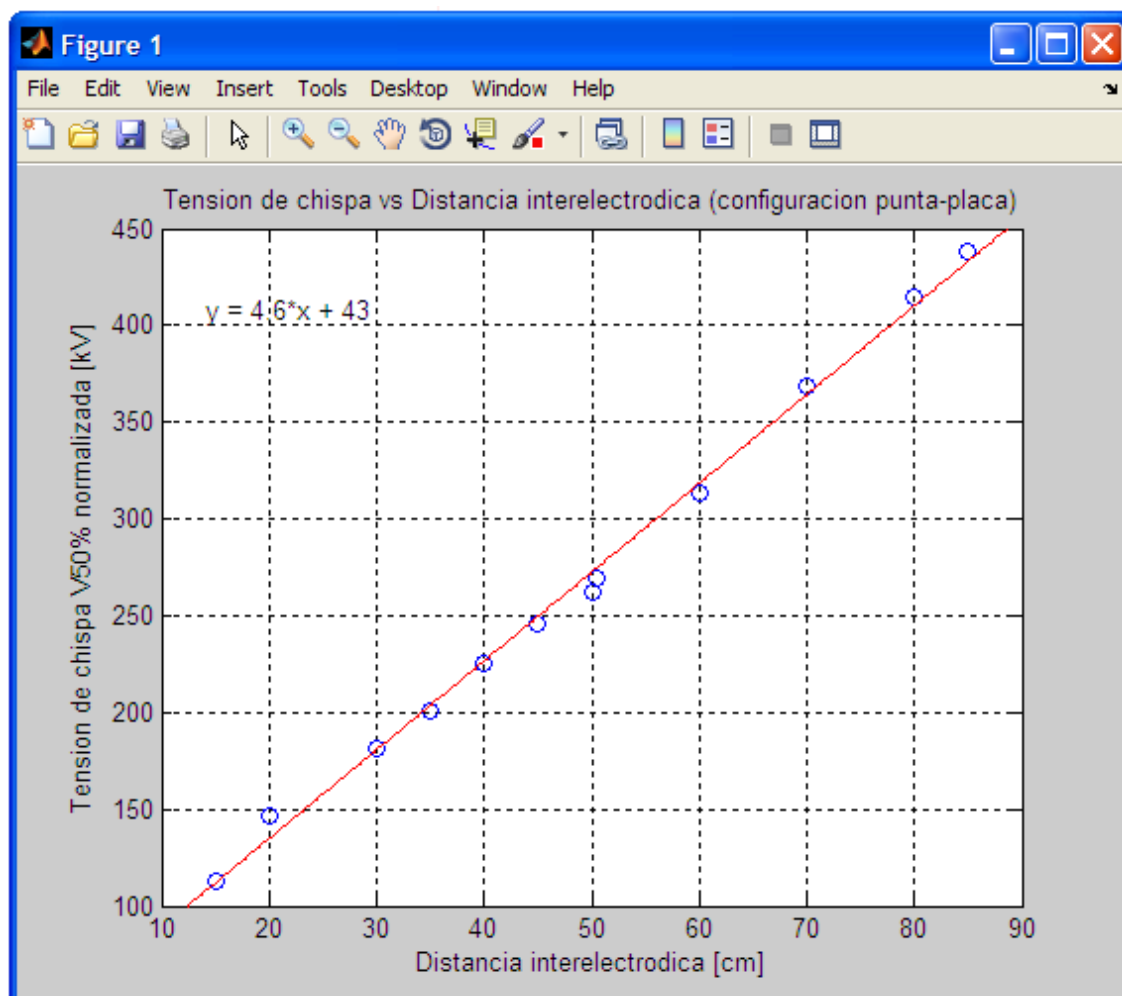
Tabla 14. Normalización de los resultados de la tensión de chispa para configuración punta-placa.

Distancia de separación [cm]	Tensión de chispa $V_{50\%}$ [kV]	Tensión de chispa $V_{50\%}$ normalizada[kV]
15	103,37	112,5
20	136,09	146,8
30	167,92	181,7
35	186,74	201
40	209,54	225,5
45	227,89	245,5
50	244,24	262,7
50,4	248,89	269,1
60	292,46	313,1
70	347,20	368,8
80	383,03	414,2
85	405,52	438,5

Fuente: Autor.

Graficando los puntos correspondientes a la tensión de chispa normalizada contra distancia de separación y con la ayuda de MATLAB se tiene:

Figura 28. Regresión lineal de la tensión de chispa vs distancia de separación interelectrónica para configuración punta-placa.



Fuente: Autor.

La regresión lineal arroja la siguiente expresión que permite realizar la estimación de la tensión de chispa esperada normalizada para la configuración punta-placa.

$$V_{50\%} = 43 + 4,6d \quad (5.2)$$

En donde d se toma en centímetros (cm) y $V_{50\%}$ en kV.

Esta ecuación arroja valores de tensión normalizados, por consiguiente a la hora de ser utilizada en un caso experimental, los resultados de esta ecuación deben ser llevados a las condiciones de laboratorio actuales durante la prueba.

Entonces para la prueba piloto planteada en este proyecto, utilizando la ecuación 5.2, se tiene la estimación de la tensión de chispa normalizada esperada para una distancia de separación de 60 cm y configuración punta-placa.

$$V_{50\%}^* = 43 + 4,6(60) = 319 [kV]$$

Llevando esa tensión a las condiciones de laboratorio (tabla 9), utilizando el programa V50UD se tiene que:

$$V_{50\%}^* = 292 [kV]$$

Como siguiente paso, se procede a calcular la tensión inicial a aplicar en la configuración electródica. Para esto se realizaron 4 ensayos diferentes con el fin de observar la influencia del factor (entre 1.5 y 3) presente en la ecuación 2.1 y mejorar el rango de este, buscando obtener un número de niveles de tensión adecuado (ver numeral 2.1.1) antes de la primera chispa efectiva.

En la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos para este fin a partir la ecuación 2.1 y variando su factor.

$$V_0 = V_{50\%}^* - (1,5 \text{ a } 3)(0,03)V_{50\%}^*$$

Tabla 15. Número de soportes antes de la primera chispa efectiva vs factor de la ecuación experimental 2.1.

FACTOR	Tensión por etapa inicial V_0 [kv]	Nivel aplicado en baja tensión [V] (medido por el osciloscopio)	Número de soportes antes de la primera chispa efectiva
1,5	50	392	2
2	47,7	376	6
2	48,3	384	4
3	46,2	375	7

Fuente: Autor.

Se observa que para un factor mayor a 2, el número de soportes antes de la primera chispa efectiva es muy elevado generando demasiados impulsos aplicados perdidos, acarreado las consecuencias mencionadas en el numeral 2.1.1.

Puede verse también en los resultados de la tabla 15 que para un factor de 1,5, este número de soportes es razonable y adecuado (ver numeral 2.1.1). Sin embargo debido a que la tensión de chispa obedece a parámetros aleatorios, no se puede determinar o establecer el valor de 1,5 como exacto para calcular la tensión inicial, pero con base en el comportamiento del número de soportes antes de la primera chispa efectiva para cada valor, se puede afinar este factor, brindando una relativa precisión en el cálculo de esta tensión inicial.

Para el caso experimental presentado y según la ecuación 2.1 teniendo $V_{50\%}^*$ podemos calcular la tensión inicial V_0 a aplicar, utilizando un factor de 1,5. Se tiene entonces:

$$V_0 = 292 - (1,5)0,03 * 292 = 279 [kV]$$

De igual forma, utilizando la ecuación 2.6, se calculan los pasos de tensión aplicados (ΔV), utilizando un factor de 1,5% según lo propuesto por la norma IEEE std 4 de 1995 (ver numeral 2.1.2).

$$\Delta V = (0,015)292 = 4,4 \text{ [kV]}$$

Los valores anteriores deben ser corregidos teniendo en cuenta la eficiencia del generador de impulsos que es del 93%, y el número de etapas de este, en este caso 6, por lo tanto:

$$V_0/etapa = \frac{279}{0,93 * 6} = 50 \text{ [kV]}$$

$$\Delta V/etapa = \frac{4,4}{0,93 * 6} = 0,8 \text{ [kV]}$$

En la tabla 16 se resumen los parámetros para la prueba piloto.

Tabla 16. Parámetros de la prueba.

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICA
Configuración	Punta-placa
Distancia de separación	60 cm
Tensión de chispa esperada	292 kV
Tensión inicial aplicada por etapa	50 kV
Pasos de tensión (ΔV) por etapa	0,8 kV
Número de aplicaciones de tensión	20

Fuente: Autor.

Siguiendo la metodología Up and Down se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 17. Resultados de la prueba.

Nivel de tensión/etapa [kV]	Nivel aplicado en baja tensión [V] (medido por el osciloscopio)	Soportes O	Chispas X
50,8	392	1	0
51,6	402	2	1
52,4	406,3	7	1
53,2	412,6	1	6
54	420	0	1

Fuente: Autor.

La relación de transformación del divisor capacitivo es de 720,5: 1 (numeral 5.1.2), por lo tanto se pueden resumir los datos anteriores con valores de tensión del lado de alta (tabla 18), esto será útil a la hora de ingresar los datos en el programa V50UD para determinar la tensión de chispa, se tiene entonces:

Tabla 18. Resumen resultados de la prueba.

Nivel de tensión [kV]	Soportes O	Chispas X
282,4	1	0
289,6	2	1
292,7	7	1
297,3	1	6
302,6	0	1
Total	11	9

Fuente: Autor.

Al ingresar los resultados de la prueba al programa V50UD, se obtiene que:

Tabla 19. Tensión de chispa según la norma IEEE std de 1995 y Dixon y Mood para la metodología Up and Dow del caso experimental realizado.

PROCEDIMIENTO	Tensión de chispa $V_{50\%}$ [kV]	Tensión de chispa normalizada [kV]
Norma IEEE std4 de 1995	293,8	321,2
Dixon y Mood	293,9	321,3
Desviación estándar (Dixon y Mood) [kV]	3,91	

Fuente: Autor.

De los resultados se puede observar que la tensión de chipa esperada calculada inicialmente y los resultados obtenidos no difieren de manera significativa (0,6%).

Se observa que los coeficientes tomados para las ecuaciones 2.1 y 2.6 de 1,5 y 1,5% correspondiente a la tensión inicial a aplicar y a los pasos de tensión respectivamente fueron seleccionados correctamente.

Sin embargo, para dar una conclusión más certera es necesario realizar más pruebas a distintas separaciones entre electrodos, y validar el resultado obtenido en esta prueba piloto.

6. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- ✓ La tensión de chispa $V_{50\%}$ es un parámetro muy importante en las aplicaciones relacionadas a la coordinación de aislamiento, ya que a partir de este valor pueden determinarse los niveles de aislamientos básicos BIL y SIL los cuales corresponden al valor de tensión a la cual existe el 10% de probabilidad de descarga para un aislamiento para impulso atmosférico e impulsos maniobra respectivamente. De forma general la tensión de chispa es utilizada para determinar la tensión de descarga a cualquier probabilidad según se requiera (ecuación 1.3).
- ✓ En los sistemas de altas tensiones se encuentran una gran variedad de formas de electrodos y perfiles de terminación que pueden ser representadas en el laboratorio por medio del factor electrogeométrico (K_g) utilizando la configuración punta –placa cuyo factor es 1 tal que las demás configuraciones electródicas de prueba conocidas puedan ser representadas a través de ésta.
- ✓ El estado del arte relacionado a las metodologías para la determinación de la tensión de chispa $V_{50\%}$ es escaso y disperso, sin embargo, en este trabajo de grado se documentó la información y los elementos necesarios para la ejecución de las metodologías **Up and Down** y **niveles múltiples** dando como resultado un documento didáctico que sirve de referencia en la aplicación de estas.
- ✓ Se documentaron y detallaron los procedimientos estadísticos propuestos por la norma IEEE y Dixon y Mood para la determinación de la tensión de chispa y su desviación estándar para este último. Los resultados al aplicar estos métodos estadísticos no difieren de manera significativa para un mismo caso.

- ✓ Se detallaron y recopilaron los procedimientos estipulados por la norma IEEE de corrección por condiciones atmosféricas incluyendo la última adición IEEE std 4a del 2001 para distancias menores a un metro.
- ✓ Se determinaron expresiones analíticas para determinar una estimación la tensión de chispa en las configuraciones electródicas punta-punta y punta-placa basada en resultados obtenidos anteriormente en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander para distancias de separación menores a un metro.
- ✓ Al establecer las expresiones de la tensión de chispa en función de la distancia de separación para las configuraciones punta-punta y punta -placa, se evidencio la relación lineal que existe entre estas dos variables.
- ✓ Se realizó un cálculo tipo de los procedimientos estadísticos en la determinación de la tensión de chispa para la metodología **Up and Down** propuestos por la norma IEEE y Dixon y Mood y para la metodología **Niveles múltiples** propuesto igualmente por la norma, sirviendo de ejemplos que permiten una mayor comprensión en la aplicación de estos.
- ✓ Se realizo una prueba piloto en el laboratorio de alta tensión de la UIS utilizando la metodología **Up and Down** en el cual se aplicaron todos los procedimientos expuestos es este trabajo de grado para la determinación de la tensión de chispa para dicha metodología, incluyendo los procedimientos de corrección por condiciones atmosféricas.
- ✓ Los resultados de la tensión de chispa para la prueba piloto realizada en el laboratorio respaldan y validan la expresión obtenida de forma

experimental (ecuaciones 2.1) en este laboratorio para determinar la tensión de chispa inicial a aplicar durante la ejecución de la metodología **Up and Down**.

- ✓ Por medio de los ensayos realizados pudo afinarse la ecuación 2.1 para la obtención de la tensión inicial aplicada utilizando la metodología **Up and Down**, brindando un criterio de mayor certeza a la hora de determinar este valor de tensión, el cual se ve reflejado en ahorro de energía y tiempo.
- ✓ Se diseñó y desarrolló un algoritmo de interface grafica en la herramienta computacional MATLAB que permite determinar la tensión de chispa a condiciones de laboratorio y normalizada para la metodología **Up and Down** utilizando los procedimientos estadísticos estipulados y propuestos por la norma IEEE y Dixon y Mood como también los procedimientos de corrección por condiciones atmosféricas para distancias mayores y menores a un metro propuestos por la norma IEEE.
- ✓ Se cumplieron en su totalidad los objetivos planteados en este trabajo de grado.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Barragán, diego. Manual de interface grafica de usuario en MATLAB, parte 1.
- [2] CASTELLANOS, Henry. Tensión de chispa para distancias de aislamiento hasta de un metro con impulsos de polaridad positiva, utilizando electrodos punta-punta y punta-placa. Bucaramanga 1996. Tesis de grado (Magister en Potencia Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones.
- [3] CHACÓN, Julio C., Contrastación de las normas existentes en el cálculo de los factores de corrección por condiciones atmosféricas utilizando electrodos punta-punta. Bucaramanga 1995. Tesis de grado (Magister en Potencia Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones.
- [4] HAUSCHILD, W. y MOSCH, W. Statistical techniques for high-voltage engineering. Peter peregrinus Ltd. English edition. London, 1992.
- [5] HILEMAN, Andrew R. Insulation coordination for power systems. Taylor & Francis group. First edition. 1999.
- [6] IEEE publicación Std 4 – 1995 Standard Techniques for high voltage testing.
- [7] IEEE publicación Std 4a – 2001 Amendment to IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. (Std 4- 1995).
- [8] LASTRE, Heidier. Contrastación de las normas existentes en el cálculo de los factores de corrección por condiciones atmosféricas utilizando electrodos punta-placa. Bucaramanga, 1996. Tesis de grado (Magister en Potencia Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica electrónica y Telecomunicaciones.

[9] RUGELES, Julio. Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión. 2ª edición. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1991.

[10] RUGELES, J. y CHACÓN J., Manual de laboratorio de alta tensión. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2006.

[11] IV seminário de controle de qualidade nas empresas de energia elétrica. Métodos estatísticos para ensaios dielétricos em alta tensão. Centro de pesquisas de energia elétrica CEPEL. Sao paulo, noviembre de 1981.

ANEXOS

Anexo A. Protocolo de resultados experimentales.

En este anexo se presenta la información y resultados obtenidos durante el proceso de ejecución de las pruebas en el laboratorio de alta tensión de la UIS.

Los datos son mostrados en un formato diseñado para registrar en él la información más importante durante este proceso.

Protocolo de ensayo

Metodología de ensayo Up and Down									
Configuración:			Separación:			Polaridad:		Tipo Impulso:	
Condiciones de laboratorio									
Temperatura [°C] :			Presión [mm Hg]:			Humedad relativa (%):			
Tensión por etapa [kV]	Tensión en lado de baja [V]	Chispa (X) Soporte (O) Superíndice (secuencia)							

Consignando la información de las pruebas realizadas en el formato anterior, se tiene:

Metodología de ensayo Up and Down									
Configuración: punta placa			Separación: 60 cm			Polaridad: positiva		Tipo Impulso: IA	
Condiciones de laboratorio									
Temperatura [°C] : 25,6			Presión [mm Hg]: 680			Humedad relativa (%): 66			
Tensión por etapa [kV]	Tensión en lado de baja [V]	Chispa (X) Soporte (O) Superíndice (secuencia)							
50	388	O							
50,8	392	O	O ²						
51,6	402	X ¹	O ³	O ⁷					
52,4	406,3	O ⁴	X ⁶	O ⁸	O ¹⁰	O ¹²	O ¹⁴	O ¹⁶	O ²⁰
53,2	412,6	X ⁵	X ⁹	X ¹¹	X ¹³	X ¹⁵	O ¹⁷	X ¹⁹	
54	420	X ¹⁸							

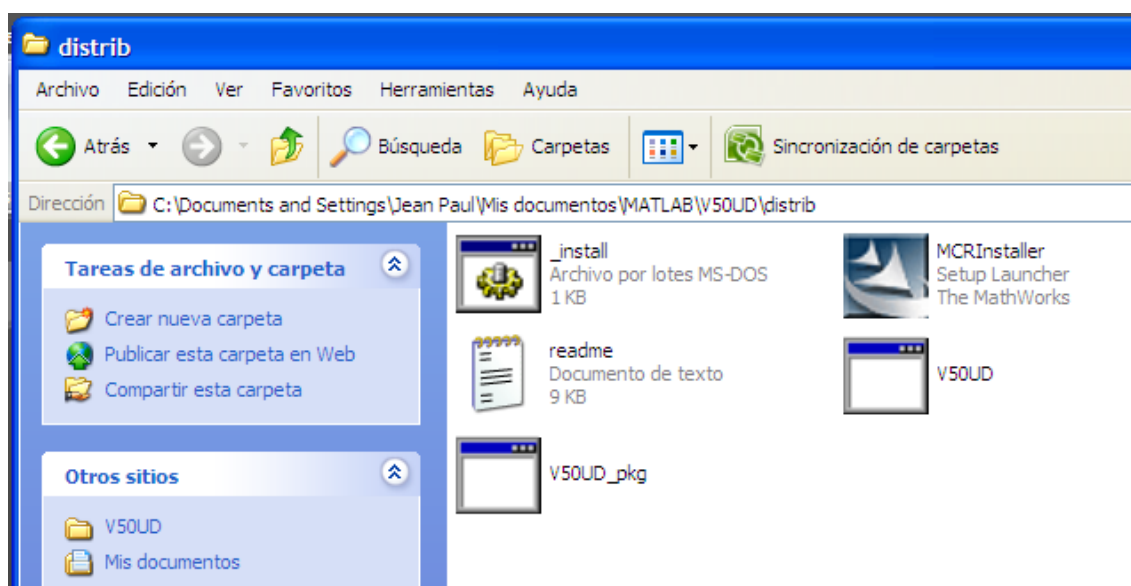
Anexo B. Manual de usuario V50UD

V50UD, es un programa creado y diseñado en MATLAB por el autor del proyecto de grado: Tensión de chispa. Determinación y análisis estadístico de resultados. Este programa permite calcular la tensión de chipa para los resultados obtenidos en la aplicación de la metodología Up and Down a condiciones de laboratorio y normalizada simultáneamente con base en los procedimientos estadísticos y de corrección estipulados por la norma IEEE std 4 de 1995 y su adición std 4a del 2001 para corrección por condiciones atmosféricas en distancias de separación interelectródica mayores y menores a un metro. Arroja también el valor de tensión de chispa según el procedimiento estadístico propuesto por Dixon y Mood. Permite también normalizar valores de tensión directamente y el proceso inverso (llevar tensiones normalizadas a condiciones de laboratorio).

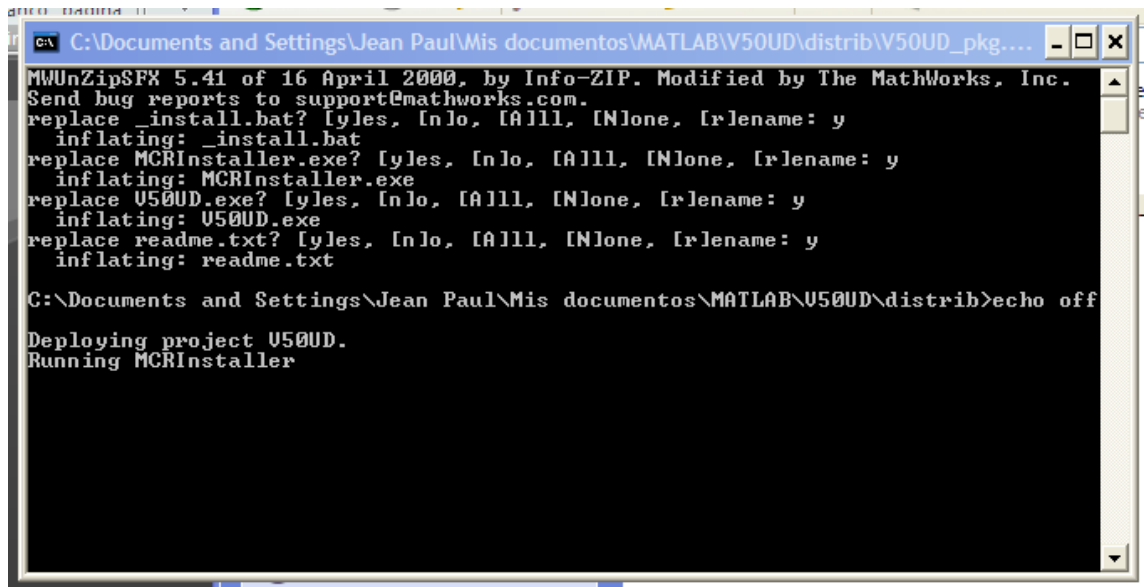
Es una herramienta de interface grafica rápida, eficiente y precisa que agiliza los cálculos para la obtención de la tensión de chispa $V_{50\%}$.

INSTALACION V50UD

Para la instalación del V50UD se ejecuta el archivo V50UD_pkg, que se encuentra en la carpeta **distrib** dentro del instalador como se muestra a continuación.



Al ejecutar el archivo se muestran las siguientes ventanas

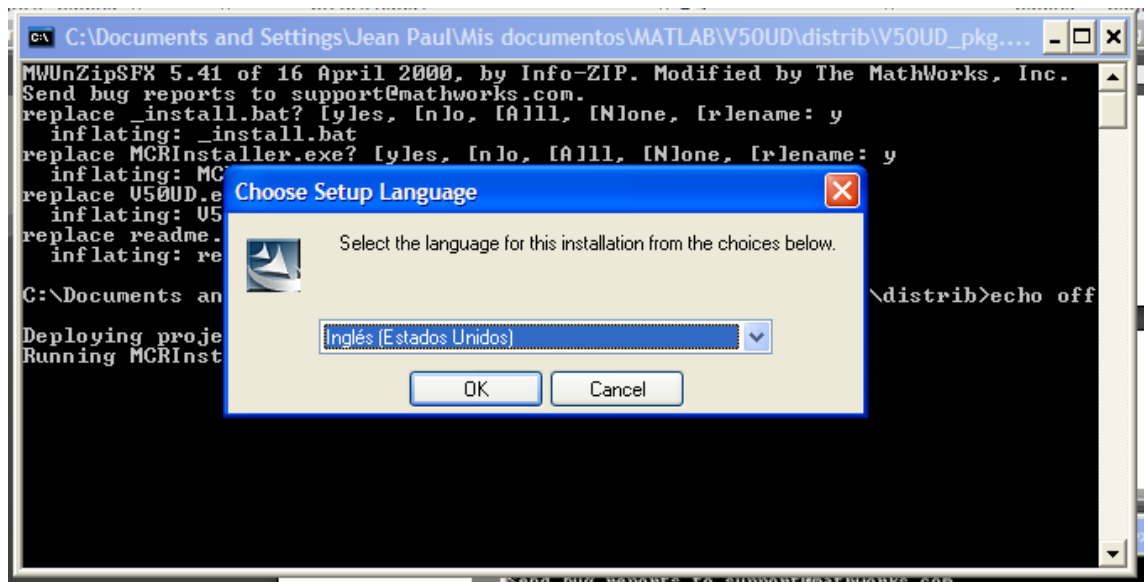


```
C:\Documents and Settings\Jean Paul\Mis documentos\MATLAB\V50UD\distrib\V50UD_pkg...
MWUnZipSFX 5.41 of 16 April 2000, by Info-ZIP. Modified by The MathWorks, Inc.
Send bug reports to support@mathworks.com.
replace _install.bat? [yles, [n]o, [A]ll, [N]one, [r]ename: y
  inflating: _install.bat
replace MCRInstaller.exe? [yles, [n]o, [A]ll, [N]one, [r]ename: y
  inflating: MCRInstaller.exe
replace U50UD.exe? [yles, [n]o, [A]ll, [N]one, [r]ename: y
  inflating: U50UD.exe
replace readme.txt? [yles, [n]o, [A]ll, [N]one, [r]ename: y
  inflating: readme.txt

C:\Documents and Settings\Jean Paul\Mis documentos\MATLAB\U50UD\distrib>echo off

Deploying project U50UD.
Running MCRInstaller
```

Posteriormente aparecerán los archivos que este extrae y la opción de ejecutar el MRC de matlab para su instalación (La instalación del MRC es indispensable para que pueda correr el V50UD).



```
C:\Documents and Settings\Jean Paul\Mis documentos\MATLAB\V50UD\distrib\V50UD_pkg...
MWUnZipSFX 5.41 of 16 April 2000, by Info-ZIP. Modified by The MathWorks, Inc.
Send bug reports to support@mathworks.com.
replace _install.bat? [yles, [n]o, [A]ll, [N]one, [r]ename: y
  inflating: _install.bat
replace MCRInstaller.exe? [yles, [n]o, [A]ll, [N]one, [r]ename: y
  inflating: MC
replace U50UD.e
  inflating: U5
replace readme.
  inflating: re

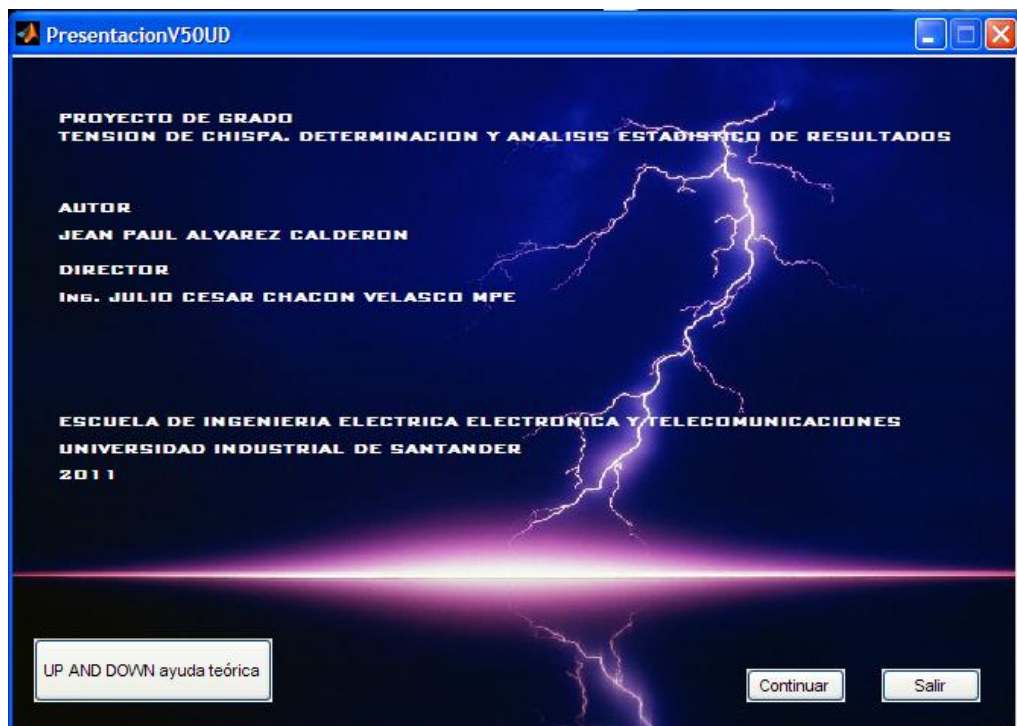
C:\Documents an
Deploying proje
Running MCRInst
```

Después de instalado el MRC, se puede correr el archivo V50UD.exe. La instalación del MRC es necesaria hacerla solo una vez en el computador.

INTERFACE GRAFICA V50UD

V50UD está conformado por dos bloques, uno de presentación y el otro propiamente programado para determinar la tensión de chispa a partir de la metodología Up and Down.

Presentación V50UD



En este bloque se presenta la información referente al programa tal como el autor, nombre del proyecto de grado (tensión de chispa. Determinación y análisis estadístico de resultados) y el director del mismo.

Consta de tres botones, dos de navegación y uno de información.

- **UP AND DOWN ayuda teórica:** Por medio de este botón se accede a la información teórica relacionada a la aplicación de la metodología Up and Down y sirve como ayuda previa al usuario en la ejecución de esta, antes de procesar los resultados en el próximo bloque. Este botón abre el capítulo dos del informe final de este proyecto de grado.
- **Continuar :** Este botón permite acceder al próximo bloque (programa V50UD) y cierra el presente (presentación)
- **Salir:** Cierra la ventana o bloque de presentación.

Programa V50UD

The screenshot displays the V50UD software interface, which is divided into two main sections. The top section, titled "TRATAMIENTO DE RESULTADOS METODOLOGIA UP AND DOWN", contains input fields for "TEMPERATURA (°C)", "PRESIÓN ATMOSFERICA (MM HG)", "HUMEDAD RELATIVA (%)", and "DISTANCIA INTERELECTRODICA (M)". It also features a grid for "NIVEL DE TENSION (kV)", "SOPORTES", and "CHISPAS". A "Calcular V50%" button is located at the bottom right of this section. The bottom section, titled "NORMALIZACIÓN", includes input fields for "NIVEL DE TENSION (kV)", "TEMPERATURA (°C)", "PRESIÓN ATMOSFERICA (MM HG)", "HUMEDAD RELATIVA (%)", and "DISTANCIA INTERELECTRODICA (M)". It also has a "Normalizar" button. To the right of this section is a sub-panel titled "LLEVAR A CONDICIONES ACTUALES DE LABORATORIO" with fields for "TENSION NORMALIZADA (kV)", "TEMPERATURA (°C)", "PRESIÓN ATMOSFERICA (MM HG)", "HUMEDAD RELATIVA (%)", and "DISTANCIA INTERELECTRODICA (M)", along with a "Calcular" button. The top right of the interface shows a "RESULTADOS" section with fields for "V50% (kV)", "V50% NORMALIZADA (kV)", and "DESVIACION ESTANDAR (kV)", along with a "Calcular V50%" button. The interface also includes a "Limpiar" button, a "Volver" button, and an "Acerca de..." button.

Este bloque o ventana consta de 2 paneles generales que son:

- Tratamiento de resultados para metodología Up and Down.
- Normalización.

El primero realiza el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos al realizar la metodología Up and Down. Las variables de entrada son las condiciones atmosféricas al momento de realizadas las pruebas como los niveles de tensión resultantes y el número de chispas(X) y soportes (0) en dichos niveles. Está diseñado para máximo cinco niveles de tensión debido a que se considera que una buena aplicación de la metodología mencionada no debería generar más de este número de niveles (incluso se esperarían menos niveles de tensión).

Como datos de salida, se tiene la tensión de chispa a condiciones de laboratorio y normalizada según los procedimientos propuestos por la norma IEEE y Dixon y Mood, la desviación estándar para este ultimo y además el nivel de aislamiento básico (BIL) para la configuración eléctrica y su respectiva distancia de separación.

El panel de normalización como su nombre lo indica, está diseñado para normalizar niveles de tensión directamente sin necesidad de haber realizado la metodología Up and Down (es decir, sin necesidad de utilizar o realizar todo el proceso del primer panel), como variables de entrada tiene también las

condiciones atmosféricas a la cual se obtuvo la tensión a normalizar y como salida la tensión normalizada.

Además este panel de normalización realiza el proceso inverso, es decir, llevar un valor de tensión normalizado a condiciones actuales de laboratorio.

En general este bloque posee 8 botones que son:

- **Calcular $V_{50\%}$** : Calcula la tensión de chispa para la metodología Up and Down.
- **Obtener BIL**: Arroja el nivel de aislamiento básico para la configuración electródica de prueba una vez calculada la tensión de chispa.
- **Normalizar**: Normaliza el valor de tensión deseado.
- **Calcular**: Lleva a condiciones de laboratorio el nivel de tensión normalizado deseado.
- **Limpiar**: Limpia todos los campos del bloque.
- **Volver**: Cierra este bloque o ventana y regresa a la presentación del V50UD
- **Salir**: Cierra o sale del V50UD.
- **Acerca de...** : Presenta información.

OBSERVACIONES

- En los campos de temperatura, el valor ingresado no puede ser mayor a 32°C.
- Las distancias de separación interelectródicas deben ser mayores que cero, debido a que de forma contraria no sería un caso real válido para configuraciones electródicas.
- Los campos no utilizados en el panel de tratamiento de resultados para metodología Up and Down deben ser llenados con ceros.
- Las variables de entrada no pueden ser diferentes a caracteres numéricos.

Estas observaciones serán recordadas por medio de mensajes instantáneos durante el ingreso de datos en el programa V50UD.

Anexo C. Listado código V50UD

Programa de interface grafica para el cálculo de la tensión de chispa (ver Anexo B). Versión R2008a de MATLAB.

PRESENTACION V50UD

```
function varargout = PresentacionV50UD(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @PresentacionV50UD_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @PresentacionV50UD_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function PresentacionV50UD_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
a=imread('fondorayol.jpg');
image(a)
axis off
text(50,70,'PROYECTO DE GRADO','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,90,'TENSION DE CHISPA. DETERMINACION Y ANALISIS ESTADISTICO DE
RESULTADOS','Fontname','BankGothic MD BT','FontSize',8,'Fontangle','normal',
...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,170,'AUTOR','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,200,'JEAN PAUL ALVAREZ CALDERON','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,240,'DIRECTOR','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,270,'Ing. JULIO CESAR CHACON VELASCO MPE','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,410,'ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA ELECTRONICA Y
TELECOMUNICACIONES','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
```

```

'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,440,'UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);
text(50,470,'2011','Fontname','BankGothic MD
BT','FontSize',8,'Fontangle','normal', ...
'Fontweight','Bold','color',[1 1 1]);

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = PresentacionV50UD_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function archivo_Callback(hObject, eventdata, handles)
WinOpen('METODO.pdf')

function continuar_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;
close all;
clc;
V50;

function salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all; close all;clc;

```

PROGRAMA V50UD

```

function varargout = V50(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @V50_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @V50_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function V50_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

a=imread('fondo4.jpg');
image(a)

```

```

axis off

handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

function varargout = V50_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function tem_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject, 'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.tem=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop, 'string', 'default');
set(handles.chi, 'string', 'default');
set(handles.sop, 'visible', 'off');
set(handles.chi, 'visible', 'off');
set(handles.ts, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.bil, 'string', 'default');
set(handles.bil, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.text50, 'visible', 'off');
set(handles.BILSIL, 'enable', 'off');
if handles.tem > 32;
msgbox('El valor de la temperatura debe ser menor a 32
(°C)', 'MENSAJE')
end

function tem_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function pre_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject, 'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.pre=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop, 'string', 'default');
set(handles.chi, 'string', 'default');
set(handles.sop, 'visible', 'off');
set(handles.chi, 'visible', 'off');
set(handles.ts, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.bil, 'string', 'default');

```

```

set(handles.bil, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.text50, 'visible', 'off');
set(handles.BILSIL, 'enable', 'off');

function pre_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function hum_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject, 'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.hum=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop, 'string', 'default');
set(handles.chi, 'string', 'default');
set(handles.sop, 'visible', 'off');
set(handles.chi, 'visible', 'off');
set(handles.ts, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.bil, 'string', 'default');
set(handles.bil, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.text50, 'visible', 'off');
set(handles.BILSIL, 'enable', 'off');

function hum_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function dis_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject, 'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.dis=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop, 'string', 'default');
set(handles.chi, 'string', 'default');
set(handles.sop, 'visible', 'off');
set(handles.chi, 'visible', 'off');
set(handles.ts, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.bil, 'string', 'default');
set(handles.bil, 'visible', 'off');

```

```

set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.text50, 'visible', 'off');
set(handles.BILSIL, 'enable', 'off');
if handles.dis>0,
msgbox(' A continuacion llenar los campos no utilizados con
ceros', 'ADVERTENCIA')

end
if handles.dis ==0,
    msgbox(' La distancia interelectroica debe ser mayor que cero
(caso fisicamente no valido)', 'ADVERTENCIA')
end

function dis_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function v1_Callback(hObject, eventdata, handles)
xxx=1
Val=get(hObject, 'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.v1=NewVal;
guidata(hObject, handles)

set(handles.sop, 'string', 'default');
set(handles.chi, 'string', 'default');
set(handles.sop, 'visible', 'off');
set(handles.chi, 'visible', 'off');
set(handles.ts, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.bil, 'string', 'default');
set(handles.bil, 'visible', 'off');
set(handles.tc, 'visible', 'off');
set(handles.text50, 'visible', 'off');
set(handles.BILSIL, 'enable', 'off');

function v1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

function o1_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject, 'String');

```

```

NewVal = str2double(Val);
handles.ol=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function ol_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function x1_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.x1=0;
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.x1=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');
function x1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function v2_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);

```

```

handles.v2=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function v2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function o2_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.o2=0;
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.o2=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function o2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function x2_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.x2=0;
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);

```

```

handles.x2=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function x2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function v3_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);

handles.v3=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function v3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function o3_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.o3=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function o3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function x3_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.x3=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function x3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function v4_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.v4=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function v4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function o4_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.o4=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');

set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function o4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function x4_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.x4=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function x4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function v5_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.v5=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function v5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function o5_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.o5=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function o5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function x5_Callback(hObject, eventdata, handles)

Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.x5=NewVal;
guidata(hObject,handles)
set(handles.sop,'string','default');
set(handles.chi,'string','default');
set(handles.sop,'visible','off');
set(handles.chi,'visible','off');
set(handles.ts,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.bil,'string','default');
set(handles.bil,'visible','off');
set(handles.tc,'visible','off');
set(handles.text50,'visible','off');
set(handles.BILSIL,'enable','off');

function x5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function calcularv50_Callback(hObject, eventdata, handles)
clc

```

```

set(handles.BILSIL, 'enable', 'on');
T=20;
P=760;
H=11;

t=handles.tem;
p=handles.pre;
h=handles.hum;
d=handles.dis;

v11=handles.v1
if isnan(v11)

v11=0;
end
v22=handles.v2;
if isnan(v22)

v22=0;
end
v33=handles.v3
if isnan(v33)
set(handles.v3, 'String', 0);
v33=0;
end
v44=handles.v4;
if isnan(v44)

v44=0;
end
v55=handles.v5;
if isnan(v55)

v55=0;
end
x11=handles.x1;
if isnan(x11)

x11=0;
end
x22=handles.x2;
if isnan(x22)

x22=0;
end
x33=handles.x3;
if isnan(x33)

```

```

x33=0;
end
x44=handles.x4;
if isnan(x44)

x44=0;
end
x55=handles.x5;
if isnan(x55)

x55=0;
end
o11=handles.o1;
if isnan(o11)

o11=0;
end
o22=handles.o2;
if isnan(o22)

o22=0;
end
o33=handles.o3;
if isnan(o33)

o33=0;
end
o44=handles.o4;
if isnan(o44)

o44=0;
end
o55=handles.o5;
if isnan(o55)

o55=0;
end

V1=[v11 v22 v33 v44 v55]
X1=[x11 x22 x33 x44 x55]
O1=[o11 o22 o33 o44 o55]

for i=1:5
    if V1(i)==0;
        c(i)=1;
    else
        c(i)=0;
    end
end

```

```

end
sum(c);
N=5-sum(c)
for i=1:N
    V(i)=V1(i)
    X(i)=X1(i);
    O(i)=O1(i);
end
for i=1:N
    vn(i)=V(i)*(X(i)+ O(i));

    end
    V50n1=sum(vn)/(sum(X)+ sum(O));
    q=fix(V50n1);
    l=V50n1-q;
    rr=10*l;
    qq=fix(rr);
    ll=qq/10;
    V50n=ll+q;
    D=(max(V)-min(V))/(N-1);
    if sum(X)<=sum(O)
        for i=1:N
            vdm(i)=V(i)*X(i);
            V50dm1=(sum(vdm)/sum(X))-(D/2);
            q=fix(V50dm1);
        l=V50dm1-q;
        rr=10*l;
        qq=fix(rr);
        ll=qq/10;
        V50dm=ll+q;
            a(i)=V(i)*V(i)*X(i);
            b(i)=V(i)*X(i);
            f=sum(b)*sum(b);
            c=1.62/D;
            j=f/sum(X);
            ex=0.047*D;
            DEdm=c*((sum(a)-j)/sum(X))+ex;

        end
    else
        sum(X)>sum(O)
        for i=1:N
            vdm(i)=V(i)*O(i);
            V50dm1=(sum(vdm)/sum(O))+(D/2);
            q=fix(V50dm1);
        l=V50dm1-q;
        rr=10*l;
        qq=fix(rr);
        ll=qq/10;
        V50dm=ll+q;
            a(i)=V(i)*V(i)*O(i);

```

```

        b(i)=V(i)*O(i);
        f=sum(b)*sum(b);
        c=1.62/D;
        j=f/sum(O);
        e=0.047*D;
        DEdm=c*((sum(a)-j)/sum(O))+e;

end
end

x=[ -10 0 10 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32];
y=[2.10 4.8 9.4 17.33 17.70 19. 20 21.3 22.67 23.67 25 26.67 28.33
30.33 31.67 32.67];
xi = -10:.1:32;
yi = interp1(x,y,xi);
tt=round(t);
e=find(xi==tt);
v=yi(e)
ha=(h*v)/100;
haa=round(ha);
W=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26];
Z=[1.1 1.09 1.08 1.07 1.06 1.05 1.04 1.034 1.025 1.016 1.008 1 0.99
0.982 0.975 0.968 0.96 0.95 0.945 0.94 0.93 0.923 0.916 0.91 0.9 0.895
0.89];
Wi = 0:.01:26;
Yi = interp1(W,Z,Wi);
ex=find(Wi==haa);
kx=Yi(ex);

if d>=1
    A=(p/P)*((273+T)/(273+t));
    k=1+0.01*((ha/A)-11);
    g=V50n/(500*d*A*k);
    if g<=0.97
        m=(g*(g-0.2))/0.8;
        w=m;

    elseif g>0.97 & g<1.23
        w=1;

    elseif g>1.23 & g<2
        w=(2-g)/(0.66*g);

    else
        w=0;
        m=1;
    end
    K1=A^m;
    K2=k^w;

```

```

V50no1=V50n/(K1*K2);
q=fix(V50no1);
l=V50no1-q;
rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
V50no=ll+q;

g1=V50dm/(500*d*A*k);

if g1<=0.97
    m1=(g1*(g1-0.2))/0.8;
    w1=m1;

elseif g1>0.97 & g1<1.23
    w1=1;

elseif g1>1.23 & g1<2
    w1=(2-g1)/(0.66*g1);
else
    w1=0;
    m1=1;
end
K11=A^m1;
K21=k^w1;
V50dmo1=V50dm/(K11*K21);
q=fix(V50dmo1);
l=V50dmo1-q;
rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
V50dmo=ll+q;
else

mx=1;
nx=1;

Ax=((p/P)^mx)*((273+T)/(273+t))^nx;
V50no1=(V50n*kx)/Ax;
q=fix(V50no1);
l=V50no1-q;
rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
V50no=ll+q;

V50dmo1=(V50dm*kx)/Ax;
q=fix(V50dmo1);
l=V50dmo1-q;

```

```

rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
V50dmo=ll+q;

    end
    bill=0.9616*V50n;
    q=fix(bill);
l=bill-q;
rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
bil=ll+q;

V50n
DEdm
V50no
V50dmo
V50dm
set(handles.v50n, 'String', V50n);
set(handles.v50nn, 'String', V50no);
set(handles.v50dm, 'String', V50dm);
set(handles.v50dmn, 'String', V50dmo);
set(handles.des, 'String', DEdm);

set(handles.bil, 'String', bil);

set(handles.BILSIL, 'visible', 'on');

sumo= o11+o22+o33+o44+o55;
sumx= x11+x22+x33+x44+x55;

set(handles.sop, 'visible', 'on');
set(handles.chi, 'visible', 'on');
set(handles.sop, 'String', sumo);
set(handles.chi, 'String', sumx);
set(handles.ts, 'visible', 'on');
set(handles.tc, 'visible', 'on');

clear all

function BILSIL_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.bil, 'visible', 'on');

set(handles.text50, 'visible', 'on');

function ten1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject, 'String');

```

```

NewVal = str2double(Val);
handles.tem1=NewVal;
guidata(hObject,handles)

function ten1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function tem1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.tem1=NewVal;
guidata(hObject,handles)
if handles.tem1 > 32;
msgbox('El valor de la temperatura debe ser menor a 32
(°C)', 'MENSAJE')
end

function tem1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pre1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.pre1=NewVal;
guidata(hObject,handles)

function pre1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function hum1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.hum1=NewVal;
guidata(hObject,handles)

function hum1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function dis1_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.dis1=NewVal;
guidata(hObject,handles)

function dis1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function normalizar_Callback(hObject, eventdata, handles)
clc
v1=handles.ten1;
t1=handles.tem1;
p1=handles.pre1;
h1=handles.hum1;
d1=handles.dis1;
T=20;
P=760;
H=11;
x=[ -10 0 10 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32];
y=[2.10 4.8 9.4 17.33 17.70 19. 20 21.3 22.67 23.67 25 26.67 28.33
30.33 31.67 32.67];
xi = -10:.1:32;
yi = interp1(x,y,xi);
tt=round(t1);
e=find(xi==tt);
v=yi(e);
ha=(h1*v)/100;
haa=round(ha);
W=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26];
Z=[1.1 1.09 1.08 1.07 1.06 1.05 1.04 1.034 1.025 1.016 1.008 1 0.99
0.982 0.975 0.968 0.96 0.95 0.945 0.94 0.93 0.923 0.916 0.91 0.9 0.895
0.89];
Wi = 0:.01:26;
Yi = interp1(W,Z,Wi);
ex=find(Wi==haa);
kx=Yi(ex);

if d1>=1
    A=(p1/P)*((273+T)/(273+t1));

```

```

        k=1+0.01*((ha/A)-11);
        g=v1/(500*d1*A*k);
        if g<=0.97
            m=(g*(g-0.2))/0.8;
            w=m;

        elseif g>0.97 & g<1.23
            w=1;

        elseif g>1.23 & g<2
            w=(2-g)/(0.66*g);

        else
            w=0;
            m=1;
        end
        K1=A^m;
        K2=k^w;

        v1n1=v1/(K1*K2)
        q=fix(v1n1);
l=v1n1-q;
rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
v1n=ll+q;

        else
            mx=1;
            nx=1;

            Ax=(p1/P)^mx*((273+T)/(273+t1))^nx;
            v1n1=(v1*kx)/Ax;
            q=fix(v1n1);
l=v1n1-q;
rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
v1n=ll+q;

        end
        set(handles.teno,'String',v1n);

function ten2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.ten2=NewVal;
guidata(hObject,handles)

```

```

function ten2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function tem2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.tem2=NewVal;
guidata(hObject,handles)
if handles.tem2 > 32;
msgbox('El valor de la temperatura debe ser menor a 32
(°C)', 'MENSAJE')
end

function tem2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pre2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.pre2=NewVal;
guidata(hObject,handles)

function pre2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function hum2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.hum2=NewVal;
guidata(hObject,handles)

function hum2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function dis2_Callback(hObject, eventdata, handles)
Val=get(hObject,'String');
NewVal = str2double(Val);
handles.dis2=NewVal;
guidata(hObject,handles)

function dis2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
.
function salir_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;
close all;
clc;

function acercade_Callback(hObject, eventdata, handles)
msgbox('Diseñado y programado por Jean Paul alvarez Calderon
(jpx5@hotmail.com). Proyecto de grado: Tension de chispa.
Determinacion y analisis estadistico de resultados. Universidad
Industrial de Santander 2011. ','Acerca de...');

function volver_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;
close all;
clc;
PresentacionV50UD;

function limpiar_Callback(hObject, eventdata, handles)
clear all;
close all;
clc;
V50;

function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
clc
v2=handles.ten2;
t2=handles.tem2;
p2=handles.pre2;
h2=handles.hum2;
d2=handles.dis2;
T=20;
P=760;
H=11;
x=[ -10 0 10 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32];
y=[2.10 4.8 9.4 17.33 17.70 19. 20 21.3 22.67 23.67 25 26.67 28.33
30.33 31.67 32.67];

```

```

xi = -10:.1:32;
yi = interp1(x,y,xi);
tt=round(t2);
e=find(xi==tt);
v=yi(e);
ha=(h2*v)/100;
haa=round(ha);
W=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
26];
Z=[1.1 1.09 1.08 1.07 1.06 1.05 1.04 1.034 1.025 1.016 1.008 1 0.99
0.982 0.975 0.968 0.96 0.95 0.945 0.94 0.93 0.923 0.916 0.91 0.9 0.895
0.89];
Wi = 0:.01:26;
Yi = interp1(W,Z,Wi);
ex=find(Wi==haa);
kx=Yi(ex);

    if d2>=1
        A=(p2/P)*((273+T)/(273+t2));
        k=1+0.01*((ha/A)-11);
        g=v2/(500*d2*A*k);
        if g<=0.97
            m=(g*(g-0.2))/0.8;
            w=m;

        elseif g>0.97 & g<1.23
            w=1;

        elseif g>1.23 & g<2
            w=(2-g)/(0.66*g);

        else
            w=0;
            m=1;
        end
        K1=A^m;
        K2=k^w;

        v2r1=v2*(K1*K2)
        q=fix(v2r1);
l=v2r1-q;
rr=10*l;
qq=fix(rr);
ll=qq/10;
v2r=ll+q;

    else

        mx=1;
        nx=1;

```

```
Ax=( (p2/P) ^mx) * ( (273+T) / (273+t2) ) ^nx;  
v2r1=(v2/kx) *Ax  
q=fix(v2r1);  
l=v2r1-q;  
rr=10*l;  
qq=fix(rr);  
ll=qq/10;  
v2r=ll+q;  
  
end  
set(handles.tenr, 'String',v2r);
```