

TENSIÓN DE CHISPA CON IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DE POLARIDAD POSITIVA PARA DISTANCIAS DE AISLAMIENTO CORTAS, UTILIZANDO ELECTRODOS PUNTA-PUNTA Y PUNTA-PLACA

JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO

Ingeniero Electricista MPE
Profesor Escuela de Ingenierías Eléctrica
Electrónica y Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
cchacon@uis.edu.co

HENRY DALID CASTELLANOS Z

Ingeniero Electricista MPE
Universidad Industrial de Santander
hendal@uis.edu.co

RESUMEN

Se presenta el resultado de un estudio para determinar expresiones analíticas que relacionan la tensión de chispa ($V_{50\%}$) del aislamiento bajo el aire con la distancia de separación interelectródica (hasta 85 cm), utilizando impulsos atmosféricos normalizados. Estas expresiones podrán ser empleadas en el sistema eléctrico colombiano a las condiciones atmosféricas del sitio de ubicación de los equipos y aplicables a distancias cortas. Se utilizó la metodología "up and down" para determinar la $V_{50\%}$ y el método de la máxima verosimilitud para su tratamiento estadístico. El estudio se efectuó utilizando las configuraciones punta-punta y punta placa normalizadas.

PALABRAS CLAVE: Tensión de chispa, impulso atmosférico, "up-and-down", máxima verosimilitud, corrección por condiciones atmosféricas.

INTRODUCCIÓN

Frecuentemente en los sistemas eléctricos se emplea como aislante gaseoso al aire, ya sea solo o en combinación con sustancias sólidas. De ahí la importancia de su estudio para las empresas del sector eléctrico, máxime si se tiene en cuenta que la coordinación de aislamiento es fundamental para la seguridad de los equipos y del personal que tiene a su cargo el mantenimiento y la operación del sistema.

El estado del arte en el país muestra que las investigaciones en el área de la alta tensión se han encaminado a mejorar el nivel de aislamiento en los equipos, mediante el perfeccionamiento de los tipos de conexiones de puesta a tierra existentes, o del diseño del aislamiento utilizado en los mismos. Sin embargo, para coordinación de aislamiento, el cálculo de la tensión de chispa en función

de la distancia se realiza empleando los ábacos recomendados por la Electricité de France y por la British Stándar Institution [9]. Para la configuración punta-placa se dispone de las siguientes expresiones:

Tabla 1. Expresiones para la configuración punta-placa.

FUENTE	Impulso atmosférico polaridad positiva
Electricité de France	$V_{50\%} = (360 + 150)d$
British Standard Institution	$V_{50\%} = 530d$
G. Carrara y otros	$V_{50\%} = 500d$
A. Roth	$V_{50\%} = 505d$

$V_{50\%}$ es la tensión de chispa en kV

d separación entre electrodos en m.

Para la configuración punta-punta, las expresiones anteriores se corrigen de acuerdo con un factor electrogeométrico que oscila entre 1,3 y 1,4.

Para distancias inferiores a un metro, comúnmente encontradas en los sistemas de distribución, la expresión recomendada por la British Standar conduce a valores superiores a los reales y la recomendación de la Electricité de France conlleva al efecto contrario. En consecuencia al utilizar las expresiones sugeridas por la British Stándar se sobredimensiona el aislamiento mientras que al utilizar los valores recomendados por la Electricité de France el aislamiento queda subdimensionado, [3].

A nivel internacional se destacan los trabajos de Allibone y Dring [1], quienes presentan curvas que caracterizan la dependencia que la tensión de chispa tiene con la separación entre electrodos, para distancias cortas (hasta 0,8 m) y para un amplio rango de la humedad del aire. Sin embargo, esos trabajos no incluyen el análisis del efecto de la densidad del aire.

Por las razones expuestas, se abordó el trabajo de determinar expresiones analíticas que relacionan la tensión de chispa del aislamiento bajo el aire con la distancia de separación interelectródica, para distancias cortas (hasta 85 cm) y utilizando ondas de impulsos atmosféricos normalizados; con el propósito de que estas expresiones puedan ser empleadas en el sistema eléctrico colombiano, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas del sitio de ubicación de los equipos.

Para el estudio se utilizó la onda tipo impulso atmosférico de polaridad positiva (1,2/50 μ s) normalizada, con electrodos del tipo punta-punta y punta-placa normalizados.

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander, en la ciudad de Bucaramanga, a una altitud de 959 m sobre el nivel del mar. Los valores obtenidos de la $V_{50\%}$ se corrigen por condiciones atmosféricas de acuerdo con la metodología descrita en la norma IEEE Std-4 de 1995, [7], para pruebas de alta tensión.

TENSIÓN DE CHISPA $V_{50\%}$

La tensión de chispa se define como el voltaje de descarga disruptivo que tiene una probabilidad del 50% de producir una descarga en el aislamiento; es decir, que la mitad de los voltajes aplicados a este nivel de tensión producirán la ruptura del aislamiento. A este valor también se le conoce como tensión crítica de flameo (CFO).

METODOLOGÍA DE ENSAYO "UP- AND- DOWN"

La metodología "up-and-down", prueba clase 2¹, [10], permite realizar una estimación confiable de la tensión de chispa cuando los valores de tensión obtenidos se comportan de acuerdo con la distribución normal. Con este método también es posible establecer una estimación para la desviación estándar.

La metodología "up-and-down" [10], [11], se implemente de acuerdo con los siguientes pasos:

1. Para la distancia de separación dada entre electrodos se estima una tensión de chispa de inicio, $V_k = V_{50\%}$ para la cual se garantice que no exista ruptura del aislamiento.
2. Se aplica tensión al valor estimado V_k , verificando que no se produzca chispa.
3. La tensión V_k se incrementa un valor ΔV , que de acuerdo con las recomendaciones de la IEC [10] debe ser $0,03V_{50\%}^*$ para los impulsos atmosféricos².
4. El nuevo impulso de tensión $V_1 = V + \Delta V$ se aplica. Si no se presenta chispa, se incrementa la tensión aplicada en el mismo factor ΔV en pasos sucesivos hasta obtener la primera ruptura del aislamiento.
5. El voltaje al que ocurra la primera ruptura determina "el primer impulso efectivo". Es decir, el primer valor de tensión a tener en cuenta para la prueba.
6. Para continuar con el procedimiento se aplica tensión a un nivel disminuido en el mismo valor ΔV ($V_2 = V_1 - \Delta V$). Si no ocurre ruptura se incrementa la tensión en el mismo ΔV ($V_3 = V_2 + \Delta V$). Si ocurre

¹ En una prueba de clase 2, "n" grupos de "m" voltajes, esencialmente iguales, se aplican en un determinado nivel de tensión.

² Durante la ejecución de las pruebas se observó que este valor puede ser significativamente grande, de tal manera que el método no se puede implementar adecuadamente. Por esta razón, un valor para ΔV que oscile entre 0,015 y 0,03 de $V_{50\%}^*$ es un factor más práctico.

disrupción se disminuye el voltaje nuevamente en el mismo factor ΔV , y así sucesivamente hasta completar veinte (20) impulsos efectivos.

MÉTODO DE LA MÁXIMA VEROSIMILITUD (MMV)

Para asegurar la consistencia en el tratamiento de los datos de pruebas de flameo, se implementa un método de análisis de resultados de prueba. Brown [2] y Davies [5] han sugerido que el método de la máxima verosimilitud es el apropiado para estimar los parámetros de la distribución de probabilidades de ruptura, tales como la tensión de chispa, $V_{50\%}$ y la desviación estándar, σ .

Con este método se obtiene la probabilidad de flameo en una configuración interelectrónica, lo que conduce finalmente al diseño del sistema de aislamiento para determinados niveles de tensión. Según la norma IEC 60-01 o la IEEE Std-4 de 1995, los métodos de verosimilitud pueden ser usados para el análisis de los resultados de pruebas de clase 1 y 2. Estos métodos permiten una estimación de la $V_{50\%}$ y de la σ . También es posible conocer los intervalos de confianza. Al aplicar este método se aprovecha la particularidad que los valores de la tensión obtenidos durante las pruebas se distribuyen normalmente, de tal manera que el uso de la distribución gaussiana permite relacionar de la mejor forma la probabilidad de flameo con la tensión de chispa propiamente dicha, [2], [6].

Los datos necesarios para aplicar el método de la máxima verosimilitud son:

- Número de niveles de tensión aplicados (N).
- Número de chispas o disrupciones (x_k).
- Número de aplicaciones en un nivel de tensión (n_k).
- Tensión en cada nivel (V_k).

El MMV propone que la probabilidad $P(x_k)$ de obtener x_k flameos en n_k aplicaciones, está dada de acuerdo a la distribución binomial por:

$$P(x_k) = \frac{n_k!}{x_k!(n_k - x_k)!} p_k^{x_k} (1 - p_k)^{n_k - x_k} \quad (4)$$

cuya solución es, [2]:

$$S_1' \approx S_1 + \frac{\partial S_1}{\partial V_{50}} \Delta V_{50} + \frac{\partial S_1}{\partial \sigma} \Delta \sigma = 0 \quad (5)$$

$$S_2' \approx S_2 + \frac{\partial S_2}{\partial V_{50}} \Delta V_{50} + \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} \Delta \sigma = 0 \quad (6)$$

con

$$S_1 = \sum_{k=1}^N \frac{(x_k - n_k p_k)}{p_k (1 - p_k)} Z_k = 0 \quad y$$

$$S_2 = \sum_{k=1}^N \frac{(x_k - n_k p_k)}{p_k (1 - p_k)} Z_k Y_k = 0$$

$$p_k = \int_x^{V_k} Z dy$$

$$Z_k = \frac{e^{-y_k^2/2}}{\sqrt{2\pi}}$$

$$Y_k = \frac{V_k - V_{50}}{\sigma}$$

Con estas ecuaciones se obtiene un estimativo de la tensión de chispa (V_{50}) y de la desviación estándar de la misma (σ)

CORRECCIÓN POR CONDICIONES ATMOSFÉRICAS

La tensión de chispa de un aislamiento externo depende de la densidad del aire, la humedad, la lluvia y la contaminación. Para campos uniformes y con pequeñas separaciones entre electrodos la tensión de chispa sigue la ley de Paschen, $V = f(pd)$, [9]. En donde "p" es la presión y "d" es la distancia entre electrodos. Sin embargo, resulta más conveniente utilizar la densidad del aire " δ " en la ley de Paschen en lugar de la presión, ya que en este caso se tiene en cuenta el efecto de la temperatura a una presión constante.

La densidad del aire proporciona un parámetro básico para la coordinación del aislamiento en las instalaciones eléctricas sometidas a altas tensiones, debido a que las condiciones atmosféricas (presión, "p", y temperatura, "t") varían considerablemente de lugar en lugar y de tiempo en tiempo. En consecuencia, la tensión de chispa para diferentes aparatos se ve afectada por estos parámetros.

En la práctica las características de la tensión de chispa pueden ser llevadas a las condiciones estandarizadas [7],

³ La densidad del aire está dada por:

$$\delta = \left[\frac{p}{p_0} \right] \left[\frac{273 + t_0}{273 + t} \right]$$

$$t_o = 20^\circ\text{C} \quad p_o = 760 \text{ mm Hg} = 1,013 \text{ bar}$$

Además las tensiones de chispa varían con la humedad absoluta del aire, creciendo aquellas a medida que la humedad del aire aumenta. Por lo tanto, se adiciona un tercer parámetro a las condiciones estandarizadas [7],

$$h_o = 11 \text{ g/m}^3$$

El procedimiento de corrección está basado en un modelo semifísico con una aplicabilidad general.

La tensión de chispa a condiciones de laboratorio, en función de la tensión de chispa a condiciones normalizadas es [7]:

$$V_{50\%} = (V_{50\%})_o k_1 k_2 \quad (7)$$

donde:

$V_{50\%}$: Es la tensión de chispa a condiciones de laboratorio.

$(V_{50\%})_o$: Es la tensión de chispa a condiciones normalizadas.

$k_1 = \delta^m$, es el factor de corrección por densidad del aire.

$k_2 = k^w$, es el factor de corrección por humedad.

Los coeficientes m y w dependen del voltaje de interrupción de la configuración estudiada, de la separación entre electrodos y de la densidad relativa del aire [7].

El coeficiente k depende del tipo de voltaje aplicada en la prueba y para propósitos prácticos se obtiene aproximadamente como función de la relación " h/δ " [7].

DESARROLLO Y RESULTADOS

El circuito montado en el laboratorio de alta tensión de la UIS para cada una de las pruebas, es el mostrado en la figura 1.

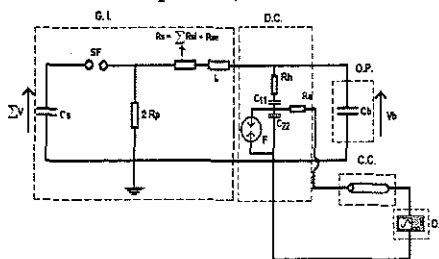


Figura 1. Circuito de Prueba y de Medida.

GI : Generador de Impulsos

DC : Divisor Capacitivo

OP : Objeto de prueba

CC : Cable Coaxial

O : Osciloscopio digital

CS : Grupo de capacitores del generador de impulsos de voltaje

SF : Gaps o explosores

Rp : Resistencia paralelo de la cola

RS : Resistencia serie del frente

Rsi : Resistencia interna en serie

Rse : Resistencia externa en serie (esterilla)

L : Inductancia serie del generador de impulsos

Rh : Resistencia de amortiguamiento

C11 : Capacitancia de alto voltaje

C22 : Capacitancia de bajo voltaje

Ra : Resistencia del terminal de acople

Cb : Objeto de prueba (Sistema de electrodos)

El montaje del sistema de electrodos (punta-punta y punta-placa) se esquematiza en la figura 2.

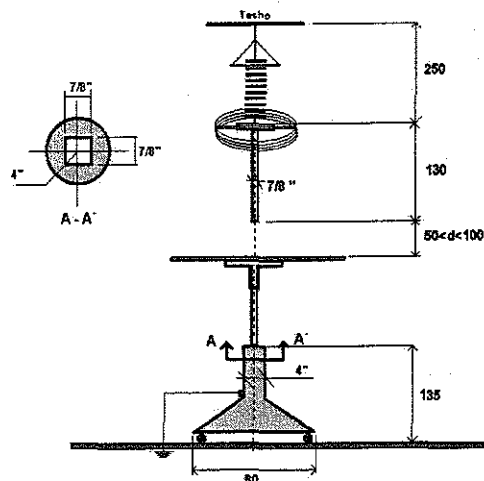


Figura 2. Montaje de electrodos.

A. Resultados de $V_{50\%}$ para la configuración punta-placa.

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas para la configuración punta-placa. Se incluyen los valores de la tensión de chispa a las condiciones de laboratorio y a las condiciones normalizadas, Asimismo, se muestran los valores de la humedad y de la densidad del aire en el momento de la ejecución de cada prueba.

TENSIÓN DE CHISPA CON IMPULSOS ATMOSFÉRICOS DE POLARIDAD POSITIVA PARA DISTANCIAS DE 9 1 AISLAMIENTO CORTAS, UTILIZANDO ELECTRODOS PUNTA-PUNTA Y PUNTA-PLACA

Tabla 2. Valores normalizados de la $V_{50\%}$ y parámetros δ , h/δ , k , m y w para la configuración punta-placa.

d [cm]	$V_{50\%}$ [kV]	$(V_{50\%})_0$ [kV]	δ	h/δ [g/m ³]	k	m	w
15	103,37	112,46	0,868	21,21	1,102	1	0,59
20	136,09	146,35	0,871	21,86	1,109	1	0,64
30	167,92	173,52	0,867	22,40	1,114	1	1
35	186,74	193,07	0,873	21,76	1,108	1	1
40	209,54	216,64	0,873	21,76	1,108	1	1
45	227,89	236,29	0,872	21,55	1,106	1	1
50	244,24	252,51	0,874	21,69	1,107	1	1
50,4	248,89	259,87	0,874	20,59	1,096	1	1
60	292,46	301,79	0,869	22,56	1,115	1	1
70	347,20	356,57	0,875	22,24	1,112	1	1
80	383,03	402,03	0,874	20,03	1,090	1	1
85	405,50	423,39	0,874	20,60	1,096	1	1

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas para la configuración punta-punta. Se incluyen los valores de la tensión de chispa a las condiciones de laboratorio y a las condiciones normalizadas.

Tabla 3. Valores normalizados de la $V_{50\%}$ para la configuración punta-punta.

d [cm]	$V_{50\%}$ [kV]	$(V_{50\%})_0$ [kV]
10	74,7	81,99
15	110,84	121,31
20	143,56	155,67
25	197,18	217,69
30	219,38	240,06
35	249,65	274,06
40	266,72	286,46
45	289,21	305,09
50	312,98	331,65
60	370,03	383,29
70	409,39	420,86

B. La tensión de chispa en función de la distancia de separación interelectródica.

Frecuentemente en ingeniería se proporcionan datos mediante un conjunto de puntos discretos, sin embargo, en muchas ocasiones se requieren estimaciones de puntos

entre estos valores. Para los casos en que los datos se miden con alta precisión, se pueden usar polinomios de interpolación. Los datos imprecisos, en general, se analizan con regresión de mínimos cuadrados, [7]. El ejemplo más simple de una aproximación por mínimos cuadrados es el ajuste de una línea recta a un conjunto de parejas de datos observados: (V_p, d_p) , (V_2, d_2) ... (V_n, d_n) . El análisis estadístico de una regresión lineal proporciona los parámetros necesarios para decidir si el conjunto de datos se asemeja a una línea recta y, por consiguiente, a los valores de la pendiente y del término independiente. Todo esto se corrobora a través del análisis de varianza y análisis de regresión.

Después de aplicar regresión lineal al conjunto de valores de tensión obtenidos experimentalmente se establecieron las siguientes relaciones entre la tensión de chispa y la separación interelectródica para las configuraciones utilizadas, ($V_{50\%} = f(d)$), corroboradas por los análisis de varianza y de regresión lineal:

Tabla 4. Relaciones $V_{50\%}$ en función de la distancia d .

Configuración	Relación $V_{50\%} = f(d)$	Intervalo, cms
Punta - Placa	$V_{50\%} = 42,92 + 4,41 d$	$10 \leq d \leq 85$
Punta - Punta	$V_{50\%} = 54,26 + 5,55 d$	$10 \leq d \leq 70$

Con $V_{50\%}$ en [kV] y d en [cm].

Tabla 5. Análisis de regresión.

Config.	Parámetro	Valor estimado	Error estándar	t- valor	r- coef	s
Punta- placa	Intercepto	42,92	5,41	7,931	0,997	7,57
	Pendiente	4,41	0,10	43,080		
Punta- punta	Intercepto	54,26	13,15	4,127	0,985	19,32
	Pendiente	5,55	0,32	17,134		

Tabla 6. Análisis de varianza.

Conf	Fuente variación	Suma cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F
Punta placa	Regresión	106336,6	1	106336,6	1855,90
	Residuo	572,965	10	57,297	
	Total	106909,5	11		
Punta punta	Regresión	109616,2	1	109616,2	293,58
	Residuo	3360,38	9	373,376	
	Total	112976,6	10		

A continuación se presentan las curvas obtenidas, junto con los correspondientes niveles de confianza, para cada configuración:

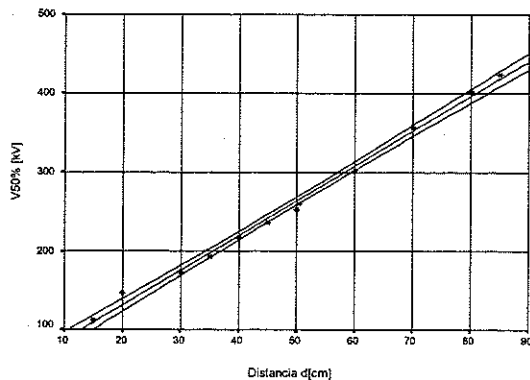


Figura 3. Configuración PUNTA-PLACA. Tensión de chispa y niveles de confianza.

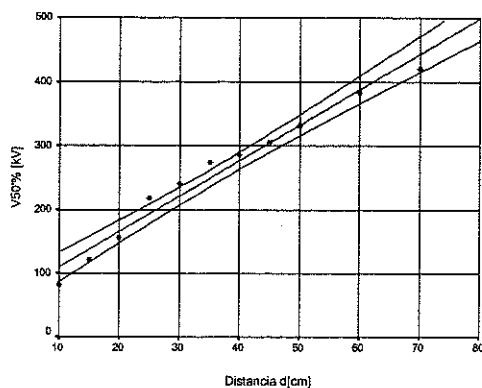


Figura 4. Configuración PUNTA-PUNTA. Tensión de chispa y niveles de confianza.

CONCLUSIONES

Con base en la aplicación de la metodología "up-and-down" se encontró la tensión de chispa para las configuraciones punta-punta y punta-placa con separaciones entre electrodos inferiores a un metro. Se utilizó el método de la máxima verosimilitud para el tratamiento estadístico de los datos conducentes a calcular la tensión de chispa, $V_{50\%}$, así como a sus niveles de confianza. Se aplicó regresión de mínimos cuadrados a los valores de tensión obtenidos experimentalmente, tratados previamente por el método de la máxima verosimilitud, en cada una de las distancias fijadas para las dos configuraciones estudiadas.

Se observó que para el rango de separación interelectrónica utilizado ($10 \leq d \leq 85$ cm), la dependencia

lineal existente entre la tensión de chispa y la separación es manifiesta y es corroborada por los análisis de regresión y varianza. Los datos experimentales, con pocas excepciones, se encuentran dentro de la banda correspondiente a los niveles de confianza establecidos del 90%.

Como resultado se proponen expresiones analíticas que permiten determinar la tensión de chispa de un aislamiento de aire en función de la distancia interelectrónica. Estas expresiones pueden ser empleadas en los niveles de distribución del sistema eléctrico colombiano para optimizar la coordinación de sus aislamientos.

REFERENCIAS

- [1] ALLIBONE, T.E. y DRING D. Influence of humidity on the breakdown of sphere and rod gaps under impulse voltages of short and long wavefronts. Proc. IEE. Vol 119, N° 9. September 1972. p.p. 1417-1422.
- [2] BROWN, G., Method of maximum likelihood applied to the analysis of flashover data. IEEE Transactions on power apparatus and systems. Vol. Pas-88. N° 12. December 1969. p.p. 1823-1830.
- [3] CHACÓN, J. C., Contrastación de las normas existentes en el cálculo de los factores de corrección por condiciones atmosféricas utilizando electrodos punta-punta. Bucaramanga, 1995, 141 p. Tesis de grado (Maestría en Potencia Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- [4] LASTRE, H. H., Contrastación de las normas existentes en el cálculo de los factores de corrección por condiciones atmosféricas utilizando electrodos punta-placa. Bucaramanga, 1995, 150 p. Tesis de grado (Maestría en Potencia Eléctrica). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Eléctrica.
- [5] DAVIES, A.J. Effect of humidity and gas density on switching impulse breakdown of short air gaps. IEE Proceedings. Vol. 135. Pt. A, N° 1. January 1988. p.p. 59-68.
- [6] DAVIES, A.J. Statistical analysis of flashover data using a generalized likelihood method. IEE

Proceedings. Vol. 135. Pt. A. Nº 1. January 1988. p.p. 79-87.

- [7] IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. Publication Std 4-1995. p.p. 92-98.
- [8] WALPOLE, R. y MYERS, R. Probabilidad y estadística. México: 3ª edición. McGraw Hill. 1995.
- [9] RUGELES, J. Conceptos básicos en Técnicas de la alta tensión. Bucaramanga: 2ª edición. Publicaciones UIS. 1991.
- [10] IEC. Technical committee No 42. High Voltage test techniques. 1988.
- [11] HAUSCHILD. W., MOSCH. W., Statistical Techniques for High-voltage engineering. London: 1ª edición. Peter Peregrinus. 1992.