

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**Nuevos Factores de Corrección para Tensiones de
Corriente Directa**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**



PRESENTA

Víctor Manuel Salazar del Moral

MÉXICO D. F.

2002

Contenido

Resumen.....	<i>i</i>
Abstract.....	<i>ii</i>
Objetivos.....	<i>iii</i>
Justificación.....	<i>iv</i>
Glosario de términos.....	<i>v</i>
Lista de símbolos.....	<i>vi</i>
Lista de figuras.....	<i>vii</i>
Lista de tablas.....	<i>xiii</i>

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Presentación.....	1
1.2 Organización de la tesis.....	3
1.3 Estado del arte.....	4
1.4 Arreglo experimental.....	10

CAPÍTULO 2: Tensiones de ruptura con polaridad positiva

2.1 Introducción.....	17
2.2 Punta cónica-plano.....	18
2.3 Punta cuadrada-plano.....	23
2.4 Punta semiesférica-plano.....	36
2.5 Influencia del perfil de los electrodos.....	43
2.6 Discusión de resultados.....	45
2.7 Conclusiones.....	46

CAPÍTULO 3: Tensiones de ruptura con polaridad negativa

3.1 Introducción.....	49
3.2 Punta cónica-plano.....	51
3.3 Punta cuadrada-plano.....	63
3.4 Punta semiesférica-plano.....	75
3.5 Influencia del perfil de los electrodos.....	89
3.6 Discusión de resultados.....	90
3.7 Conclusiones.....	91

Conclusiones generales.....	93
Recomendaciones para trabajos futuros.....	98
Referencias.....	100
Apéndice .A.....	103
Apéndice .B.....	107

RESUMEN

Para corregir tensiones de corriente directa en pruebas realizadas en laboratorios de alta tensión, se emplea la Norma Internacional IEC-60, 1-2. Pruebas experimentales realizadas recientemente a grandes altitudes sobre el nivel del mar, arriba de 2000 metros sobre el nivel del mar (msnm) han demostrado que para tensiones de corriente directa los valores experimentales difieren hasta en un 10% de los valores calculados con la norma señalada. En esas investigaciones se propuso un procedimiento de corrección diferente al que emplea la IEC-60; éste se obtuvo para una configuración punta cónica-plano por lo que se requiere obtener factores de claro que permitan hacer su uso para otros electrodos con terminaciones diferentes y posteriormente, para diversas configuraciones. Por lo tanto, en este trabajo se proponen factores de claro para la misma configuración empleando electrodos con terminación cuadrada y semiesférica, en ambas polaridades, tomando como referencia el electrodo de punta cónica. Se demuestra que la corrección por humedad absoluta no es necesaria cuando se emplean tensiones con polaridad negativa. Las pruebas se llevaron a cabo a un valor promedio de densidad relativa del aire (δ) de 0.77, correspondiente a una altitud de 2240 msnm. Los valores de tensión de ruptura se analizan en función de la humedad absoluta, del electrodo punta empleado y de la separación entre el electrodo punta y el plano. También se reporta la influencia de la altitud sobre la tensión de ruptura así como la desviación estándar de dichos valores de ruptura tanto en polaridad positiva como en polaridad negativa. De acuerdo con estos valores de desviación estándar y a los límites de linealidad que presentan los arreglos analizados, se concluye que el arreglo punta cuadrada-plano es la mejor herramienta para medir altas tensiones de corriente directa, en ambas polaridades, tanto a bajas como a grandes altitudes.

ABSTRACT

For direct current high voltage corrections in high voltage test laboratories the International Standard IEC-60 is used. Recent experimental tests at high altitude, 2240 meters above sea level (masl) using direct current voltages, have demonstrated that the experimental values are different about 10 % with those calculated with the IEC-60. In those investigations a different correction procedure was proposed. From a conical electrode rod and a configuration rod gap plane using positive polarity it was obtained. Then it is necessary to obtain gap factors in order to this new correction procedure can be used for different electrode configurations. For this purpose in this thesis gap factors, using the same configuration, for a square and a semispherical electrodes, in both polarities, are proposed. It is shown the humidity correction is not necessary when negative polarity is used. An average value of 0.77 of relative air density (δ) which corresponds at 2240 masl, during the tests was recorded. The altitude influence on the experimental breakdown values and the standard deviation in both polarities are also reported. According with those standard deviation values and their linearity limits the squared electrode rod gap plane configuration is concluded to be the best high dc voltage measurement tool both positive and negative polarities from low to high altitudes.

OBJETIVOS

Determinar factores de claro para tensiones de corriente directa, tanto en polaridad positiva como en polaridad negativa, para un electrodo de punta cuadrada y otro de punta semiesférica a partir del electrodo de punta cónica empleando la configuración punta-plano.

Conocer la influencia de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura, en ambas polaridades, para los electrodos de punta cónica, punta cuadrada y punta semiesférica, con la configuración en estudio, a gran altitud sobre el nivel del mar.

Determinar, el electrodo punta en estudio más adecuado para ser empleado como voltmetro de corriente directa, en ambas polaridades, tanto a bajas como a grandes altitudes.

JUSTIFICACIÓN

El procedimiento de corrección que emplea la Norma Internacional IEC-60 [1] se basa en pruebas experimentales llevadas a cabo a diferentes altitudes sobre el nivel del mar empleando tensiones de impulso por maniobra y rayo; a partir de esto los valores se extrapolaron para corriente directa a altitudes mayores. Las pruebas se realizaron empleando varias configuraciones por lo que el procedimiento de corrección considera intrínsecamente el factor de claro. Sin embargo, supone erróneamente que el campo de propagación de los streamers varía linealmente con la altitud; además tiene la limitante de que no aplica para valores de humedad específica (h/δ) mayores a 15 gr/m^3 . Con la finalidad de contar con un procedimiento de corrección que aplique para cualquier altitud sobre el nivel del mar, así como un intervalo mayor de humedad, Calva y Espino [2] propusieron un procedimiento de corrección (para tensiones de corriente directa) diferente al que emplea la Norma Internacional IEC-60; éste tiene la limitante de que no considera el factor de claro, por lo que es necesario llevar investigaciones con diferentes electrodos punta que permitan la obtención de dichos factores de claro; con esto, éste procedimiento sustituiría al que emplea actualmente la IEC-60. Por otro lado, para efectos de medición de altas tensiones con corriente directa, aún está por determinar la configuración electrodo punta más adecuada para emplearse como voltmetro de corriente directa, ya que aunque se cuenta con información a nivel del mar, no existen pruebas experimentales que confirmen su aplicación a grandes altitudes.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Streamer. Canal ionizado originado por la conexión sucesiva de avalanchas electrónicas.

Gases electronegativos. Gases que tienen la capacidad de capturar electrones libres.

Primer coeficiente de ionización. Número de electrones producidos por un electrón por unidad de longitud de trayectoria en la dirección del campo eléctrico.

Trayectoria libre promedio. Distancia promedio que las moléculas o partículas viajan entre colisiones.

Coefficiente de captura. Número de capturas producidas por un electrón viajando una distancia de 1cm en la dirección del campo eléctrico.

Coefficiente efectivo de ionización. Se define por la diferencia del coeficiente de ionización y el coeficiente de captura.

Avalancha electrónica. Proceso que consiste en la multiplicación de electrones en la que cada electrón que es liberado genera por impacto uno o más electrones.

Ionización. Proceso mediante el cual se libera un electrón de un átomo o partícula, produciendo simultáneamente un ion positivo.

Función trabajo. Capacidad de los materiales para no ceder electrones de su última capa de valencia.

LISTA DE SÍMBOLOS

cd	Corriente directa
δ	Densidad relativa del aire.
msnm	metros sobre el nivel del mar.
U	Tensión de ruptura a cualquier condición atmosférica
U_0	Tensión de ruptura a condiciones atmosféricas estándar
K_1	Factor de corrección, dado por el producto k_1k_2
k_1	Factor de corrección por densidad relativa del aire
k_2	Factor de corrección por humedad absoluta
b	Presión barométrica
b_0	Presión barométrica a condiciones atmosféricas estándar
t	Temperatura
t_0	Temperatura a condiciones atmosféricas estándar
h	Humedad absoluta
E_s	Campo eléctrico de propagación de los streamers
E_{s0}	Campo de eléctrico de propagación de los streamers a condiciones atmosféricas estándar
d	Separación entre el electrodo punta y el plano
k_h	Coefficiente de humedad absoluta
r	Radio de curvatura del electrodo punta
V_{b11}	Tensión de ruptura a condiciones estándar de humedad absoluta
E_{s11}	Campo eléctrico de propagación de los streamers a condiciones estándar de humedad absoluta
S	Factor de claro
σ	Desviación estándar
α	Coefficiente de ionización
λ	Trayectoria libre promedio
β	Coefficiente de captura

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
Figura 1.4.1	Arreglo experimental empleado en las pruebas de laboratorio.	11
Figura 1.4.2	Tipos de electrodos empleados para las pruebas de laboratorio: a)Punta cuadrada, b) Punta cónica y c) Punta semiesférica.	12
Figura 1.4.3	Arreglo punta cónica-plano empleado durante las pruebas de laboratorio.	13
Figura 1.4.4	(a) Fuente de alta tensión tipo cascada de hasta 600 kV. Divisores de tensión: (b) resistivo, (c) mixto.	14
Figura 2.2.1	Campo eléctrico de propagación de los streamers calculado con el modelo de la ecuación 2.2.3 para el arreglo punta cónica-plano en polaridad positiva.	20
Figura 2.2.2	Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta cónica-plano para los claros de a) 0.20 m, b) 0.40 m, c) 0.60 m, d) 0.80 m y e) 1.00 m.	22
Figura 2.3.1	Tensiones de ruptura reportadas y calculadas con la ecuación 2.2.4, para el electrodo de punta cuadrada con polaridad positiva en función de la humedad absoluta.	24
Figura 2.3.2	Campo de propagación calculado con la ecuación 2.2.3 y el obtenido mediante el ajuste de los datos experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva con $h=11.00 \text{ gr/m}^3$.	26
Figura 2.3.3	Factor de claro para obtener el campo eléctrico de propagación de los streamers para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva a condiciones estándar de humedad absoluta.	27

Figura 2.3.4	Tensiones de ruptura promedio obtenidas experimentalmente y calculadas con la ecuación 2.3.3 para el arreglo punta cuadrada-plano en función de la humedad absoluta y del claro entre electrodos.	31
Figura 2.3.5	Efecto de la separación entre electrodos sobre el coeficiente de humedad para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva.	33
Figura 2.3.6	Tensión de ruptura en función del claro entre electrodos.	34
Figura 2.3.7	Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta cuadrada-plano para los claros de a) 0.20 m, b) 0.40 m, c) 0.60 m, d) 0.80 m y e) 1.00 m.	35
Figura 2.4.1	Tensiones de ruptura promedio experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva en función de la humedad absoluta para claros de 0.20 a 1.00 m.	37
Figura 2.4.2	Campo de propagación calculado para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva en función del claro entre electrodos, para un valor de humedad absoluta de 11.00 gr/m ³ .	38
Figura 2.4.3	Factor de claro para obtener el campo eléctrico de propagación de los streamers para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva a condiciones estándar de humedad absoluta.	39
Figura 2.4.4	Tensiones de ruptura promedio experimentales y calculadas con la ecuación 2.4.3 para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva en función de la humedad absoluta para claros de 0.20 a 1.00 m.	41
Figura 2.4.5	Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta semiesférica-plano para los claros de a) 0.20 m. b) 0.40 m y c) 0.60 m.	42

Figura 2.4.6	Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta semiesférica-plano para los claros de a)0.8m y b) 1.0m	43
Figura 2.5	Tensión de ruptura para los tres electrodos punta empleados durante las pruebas de laboratorio en corriente directa con polaridad positiva en función del claro entre el electrodo punta y el plano.	44
Figura 3.2.1	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cónica-plano en función del claro.	52
Figura 3.2.2	Tensión de ruptura a 11 gr/m^3 , para el arreglo punta cónica-plano en función del claro	55
Figura 3.2.3	Coefficiente de humedad para el arreglo punta cónica-plano, en corriente directa en polaridad negativa, en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.	56
Figura 3.2.4	Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.2.3, para el arreglo punta cónica-plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros	59
Figura 3.2.5	Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.2.3, para el arreglo punta cónica-plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros.	60
Figura 3.2.6	Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cónica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.03 m y b) 0.06 m.	60
Figura 3.2.7	Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cónica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.09 m, b) 0.12 m, c) 0.15 m, d) 0.18 m, e) 0.21m y f) 0.24 m.	61

Figura 3.2.8	Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cónica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.27 m, b) 0.30 m, c) 0.33 m y d) 0.36 m.	62
Figura 3.3.1	Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano en función del claro entre electrodos.	64
Figura 3.3.2	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano obtenido mediante la relación V_{b11}/d y el calculado con el modelo 3.2.2 en función del claro entre electrodos.	65
Figura 3.3.3	Factor de claro para el arreglo punta cuadrada-plano con polaridad negativa.	65
Figura 3.3.4	Campo de eléctrico de propagación de los streamers para el arreglo punta cuadrada-plano obtenido mediante la relación V_{b11}/d y el calculado con el modelo 3.3.1 en función del claro entre electrodos.	66
Figura 3.3.5	Tensión de ruptura experimental y calculada para el arreglo punta cuadrada-plano en corriente directa con polaridad negativa en función del claro entre electrodos.	68
Figura 3.3.6	Coefficiente de humedad para el arreglo punta cuadrada-plano en corriente directa con polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano	69
Figura 3.3.7	Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.3.2 para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros.	71

Figura 3.3.8	Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.3.2 para el arreglo punta cuadrada–plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros.	72
Figura 3.3.9	Tensiones de ruptura calculadas con la ecuación 3.3.2 y la Norma Internacional IEC–60, para el arreglo punta cuadrada–plano con polaridad negativa para los claros de 0.20 y 0.40 m.	73
Figura 3.3.10	Desviación estándar de los valores de ruptura experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en función de la humedad para los claros de a) 0.03 m, b) 0.06 m, c) 0.09 m y d) 0.12 m	73
Figura 3.3.11	Desviación estándar de los valores de ruptura experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en función de la humedad para los claros de a)0.15m, b)0.18 m, c)0.21m, d)0.24 m, e)0.27 m y f)0.30 m	74
Figura 3.4.1	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano obtenido con la relación V_{b11}/d en función del claro entre electrodos.	76
Figura 3.4.2	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano obtenido con la relación V_{b11}/d y el calculado con el modelo 3.2.2 en función del claro.	77
Figura 3.4.3	Factor de claro para el arreglo punta semiesférica-plano con polaridad negativa.	77
Figura 3.4.4	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica–plano obtenido mediante la relación V_{b11}/d y calculados con la ecuación 3.4.1 en función del claro.	79
Figura 3.4.5	Tensión de ruptura a 11.00 gr/m^3 para el arreglo punta semiesférica–plano en corriente directa con polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.	81

Figura 3.4.6	Coefficiente de humedad para el arreglo punta semiesférica–plano en corriente directa en polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.	81
Figura 3.4.7	Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica–plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta.	84
Figura 3.4.8	Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica–plano en polaridad negativa en función de la humedad absoluta.	84
Figura 3.4.9	Valores de tensión de ruptura calculados con la ecuación 3.4.2 y la Norma Internacional IEC-60 para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad negativa.	86
Figura 3.4.10	Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales el arreglo punta semiesférica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.03 m, b) 0.06 m.	86
Figura 3.4.11	Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.09 m, b) 0.12 m, c) 0.15 m, d) 0.18 m, e) 0.21 m y f) 0.24 m.	87
Figura 3.4.12	Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.27 m, b) 0.30 m, c) 0.33 m y d) 0.36 m.	88
Figura 3.5	Tensiones de ruptura experimentales y calculadas para los tres perfiles de electrodo punta empleados a un valor de 11.00 gr/m ³ , en función del claro.	89

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
Tabla 1	Datos reportados por diversos investigadores a nivel del mar ($\delta=1.0$)	10
Tabla 1.4.1	Condiciones de operación registradas en polaridad positiva.	16
Tabla 1.4.2	Condiciones de operación registradas en polaridad negativa.	16
Tabla 2.2.1	Campo eléctrico de propagación de los streamers obtenido con la relación $V_b \exp/d$ y la ecuación 2.2.3 para el arreglo punta cónica-plano con polaridad positiva.	21
Tabla 2.3.1	Tensiones de ruptura experimentales y calculadas con la ecuación 2.2.4 para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva para distintos puntos de humedad absoluta.	23
Tabla 2.3.2	Tensiones de ruptura experimentales y calculadas con la ecuación 2.2.4 para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva para distintos puntos de humedad absoluta.	24
Tabla 2.3.3	Factor de claro para la configuración punta cuadrada-plano a condiciones estándar de humedad absoluta.	26
Tabla 2.3.4	Campo eléctrico de propagación calculado con la ecuación 2.3.2 y el obtenido mediante el ajuste de los datos experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva.	27
Tabla 2.3.5	Tensiones de ruptura y campo de propagación para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva para separaciones entre el electrodo punta y el plano a condiciones atmosféricas estándar [31].	28

Tabla 2.3.6	Valores de tensión de ruptura promedio obtenidos experimentalmente y calculados con la ecuación 2.3.3 para el arreglo punta cuadrada–plano en polaridad positiva para distintos puntos de humedad absoluta h para claros de 1.00, 0.80 y 0.60 m	29
Tabla 2.3.7	Valores de tensión de ruptura obtenidos experimentalmente y calculados empleando el modelo de la ecuación 2.3.3 para el arreglo punta cuadrada–plano en polaridad positiva, en función de la humedad absoluta h para claros de 0.40 m y 0.20 m	30
Tabla 2.4.1	Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.	36
Tabla 2.4.2	Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.	37
Tabla 2.4.3	Factor de claro para la configuración punta semiesférica-plano a condiciones estándar de humedad absoluta.	39
Tabla 2.4.4	Campo eléctrico de propagación calculado con la ecuación 2.4.2 y el obtenido mediante el ajuste de los datos experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva.	40
Tabla 2.4.5	Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.	40
Tabla 2.4.6	Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.	41

Tabla 3.2.1	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el electrodo de punta cónica en función del claro entre el electrodo punta y el plano a condiciones estándar de humedad absoluta.	51
Tabla 3.2.2	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos a 2240 msnm para el electrodo de punta cónica obtenidos con la relación V_{b11}/d y calculados con el modelo 3.2.2.	53
Tabla 3.2.3	Valores de tensión de ruptura experimentales y calculados empleando el modelo 3.2.3 para el arreglo punta cónica–plano en corriente directa con polaridad negativa, para separaciones entre electrodos de 0.03 m a 0.36 m	54
Tabla 3.2.4	Coefficiente de humedad absoluta para el electrodo de punta cónica en función del claro.	55
Tabla 3.2.5	Valores de tensión de ruptura experimentales y calculados empleando el modelo 3.2.3 para el arreglo punta cónica–plano con corriente directa en polaridad negativa, para separaciones entre electrodos de 0.03 m a 0.24 m	58
Tabla 3.2.6	Valores de tensión de ruptura experimentales y calculados empleando el modelo 3.2.3 para el arreglo punta cónica–plano en corriente directa con polaridad negativa para separaciones entre electrodos de 0.27 m a 0.36 m.	59
Tabla 3.3.1	Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano en corriente directa con polaridad negativa en función del claro entre el electrodo punta y el plano.	63
Tabla 3.3.2	Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el electrodo de punta cuadrada obtenidos mediante la relación V_{b11}/d y los calculados con el modelo 3.2.2.	64

Tabla 3.3.3	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano obtenido con la relación V_{b11}/d y calculado con la ecuación 3.3.1.	66
Tabla 3.3.4	Valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano con polaridad negativa, a distintos puntos de humedad absoluta y claro entre electrodos.	67
Tabla 3.3.5	Coefficiente de humedad absoluta para el arreglo punta cuadrada-plano con corriente directa y polaridad negativa en función del claro entre el electrodo punta y el plano.	69
Tabla 3.3.6	Tensiones de ruptura obtenidas experimentalmente y calculadas para el electrodo de punta cuadrada empleando la ecuación 3.3.2 a distintos puntos de humedad absoluta para claros de 0.03 a 0.18 m.	70
Tabla 3.3.7	Tensiones de ruptura obtenidas experimentalmente y calculadas para el electrodo de punta cuadrada empleando la ecuación 3.3.2 a distintos puntos de humedad absoluta para claros de 0.21 a 0.30 m.	71
Tabla 3.3.8	Valores de tensión de ruptura calculados con la ecuación 3.3.4 y la Norma Internacional IEC-60 a 2240 msnm, para el arreglo punta cuadrada-plano con polaridad negativa	72
Tabla 3.4.1	Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano en corriente directa con polaridad negativa en función del claro entre el electrodo punta y el plano.	75
Tabla 3.4.2	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el electrodo de punta semiesférica obtenidos mediante la relación V_{b11}/d y los calculados con el modelo 3.2.2.	76

Tabla 3.4.3	Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano obtenido con la relación V_{b11}/d y calculado con la ecuación 3.4.1.	78
Tabla 3.4.4	Tensiones de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en corriente directa con polaridad negativa a distintos puntos de humedad absoluta, para claros de 0.03 a 0.18 m	79
Tabla 3.4.5	Tensiones de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano con corriente directa en polaridad negativa a distintos puntos de humedad absoluta, para claros de 0.21 a 0.36 m	80
Tabla 3.4.6	Coefficiente de humedad para el arreglo punta semiesférica-plano en corriente directa con polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.	82
Tabla 3.4.7	Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica-plano con polaridad negativa, en función de la humedad absoluta.	82
Tabla 3.4.8	Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica-plano con polaridad negativa, en función de la humedad absoluta.	83
Tabla 3.4.9	Valores de tensión de ruptura calculados empleando la ecuación 3.4.2 y la Norma Internacional IEC-60 a 2240 msnm a distintos puntos de humedad absoluta, para el arreglo punta semiesférica-plano con polaridad negativa.	85

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN

El crecimiento de los sistemas de transmisión de energía eléctrica de corriente directa, ha ocasionado un incremento en las pruebas de laboratorio con tensiones de corriente directa; éstas tensiones se emplean para probar equipo que se utiliza en sistemas de transmisión en alta tensión, en los cuales las descargas internas pueden llevar a la degradación del aislamiento en condiciones de prueba con corriente alterna. También se emplean en investigaciones de la física de la descarga [3]. Para medir dicho tipo de tensiones anteriormente se empleaban los voltímetros de esferas. El error estimado al emplear voltímetros de esferas es hasta del 5 % considerando que no existen fibras en el aire. Sin embargo, ante la presencia de fibras pueden presentarse valores anormales de hasta -30% la magnitud de la tensión de ruptura promedio [4]. Debido a su gran dispersión en los valores de ruptura ante la presencia

de fibras y partículas de polvo, cuando se emplean con tensiones de corriente directa, condujeron a investigar sobre técnicas alternativas. En 1989 se estableció en la Norma Internacional IEC-60 el arreglo punta cuadrada-punta cuadrada como una alternativa en la medición de altas tensiones con corriente directa. Además de que este arreglo ofrece una dispersión menor en sus valores de ruptura no se presentan valores anormales de ruptura ante la presencia de fibras. La limitante que presentan los arreglos punta-punta en la medición de tensiones con corriente directa es que la linealidad de la tensión de ruptura contra la humedad específica se pierde para valores mayores a 13 gr/m^3 [1, 5-9]. Con el propósito de contar con una opción que ofrezca una menor desviación estándar en sus valores de ruptura y al mismo tiempo un intervalo mayor de linealidad también se ha optado por investigar las características de los arreglos punta-plano [9].

Calva y Espino [2] en sus investigaciones con tensiones de corriente directa, con polaridad positiva en arreglos punta-plano a gran altitud sobre el nivel del mar, demostraron que la suposición de la Norma Internacional IEC-60 en el sentido de que el campo eléctrico de propagación de los streamers varía linealmente con la altitud es errónea. Proponen un procedimiento de corrección, que a diferencia del empleado por la IEC-60, no considera factores de claro. Por lo tanto el presente trabajo es una continuación de las investigaciones experimentales citadas anteriormente a gran altitud. Parte de un modelo que se obtuvo a 2240 msnm para un arreglo punta cónica-plano con tensiones de corriente directa en polaridad positiva, el cual corrige por densidad relativa del aire y por humedad absoluta [2]. A partir de este modelo, se obtienen factores de claro para los arreglos punta cuadrada-plano y punta semiesférica-plano en ambas polaridades; Además, se evalúa el efecto de la humedad absoluta y del electrodo punta sobre la tensión de ruptura tanto en polaridad positiva como en polaridad negativa. Así mismo, en polaridad negativa, se modifica el factor de corrección por densidad relativa del aire y se muestra que la corrección por humedad absoluta no es necesaria.

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el capítulo 1 se presenta una introducción general de la tesis, el estado del arte y se reportan las condiciones atmosféricas presentes durante las pruebas de laboratorio (humedad absoluta, densidad relativa del aire) los electrodos y el arreglo que se empleó (claro y terminación de los electrodos). También se mencionan las características de los equipos que se utilizaron en las pruebas de laboratorio.

En el capítulo 2 se presentan los valores de tensión de ruptura obtenidos experimentalmente para tensiones de corriente directa con polaridad positiva en función de la humedad absoluta, del claro y del electrodo punta empleado; a partir del trabajo llevado a cabo en [2] se obtienen factores de claro para los electrodos de punta cuadrada y punta semiesférica. Se reporta la influencia de la humedad absoluta y del electrodo punta sobre la tensión de ruptura con $\delta = 0.77$. Se hace un análisis de la desviación estándar de los valores obtenidos experimentalmente en función de la humedad, de la separación y del electrodo punta para proponer la mejor alternativa como voltmetro de corriente directa con polaridad positiva.

En el capítulo 3 se presentan los valores de tensión de ruptura obtenidos experimentalmente para tensiones de corriente directa con polaridad negativa en función de la humedad, del claro y del electrodo punta empleado; se modifica el factor de corrección por densidad relativa obtenido en [2] y se proponen factores de claro a partir del arreglo punta cónica-plano para los electrodos de punta cuadrada y punta semiesférica. Se reporta la influencia de la humedad absoluta y del electrodo punta sobre la tensión de ruptura con $\delta = 0.77$. Se hace un análisis de la desviación estándar de los valores experimentales en función de la humedad, del claro y del electrodo punta para proponer la mejor alternativa como voltmetro de corriente directa con polaridad negativa. Finalmente, se exponen las conclusiones generales y se mencionan las recomendaciones pertinentes acerca de trabajos futuros.

1.3 ESTADO DEL ARTE.

La Norma Internacional IEC-60 está basada en investigaciones experimentales llevadas a cabo a gran altitud con tensiones de impulso por maniobra y rayo (en ambas polaridades) y empleando diversas configuraciones [10]. Anteriormente se empleaba la versión de 1973 [11], pero una revisión a ésta última [12] dio por resultado la versión actual (1989). El método de corrección está basado en la identificación del régimen de descarga de los streamers. Considera que el campo eléctrico de propagación de los streamers varía linealmente con la altitud. La norma relaciona cualquier tensión U a cualquier condición atmosférica a las condiciones estándar U_0 a través del factor de corrección K_1 :

$$U = K_1 U_0 \quad (1.1)$$

U_0 es la tensión de ruptura en condiciones estándar (humedad absoluta igual a 11 gr/m^3 y densidad relativa del aire igual a 1); para arreglos punta-punta horizontales y verticales con tensiones de corriente directa Feser y Hughes [13] proponen que U_0 es función del claro entre electrodos e independiente de la polaridad de la tensión aplicada; La tensión de ruptura U_0 en condiciones atmosféricas estándar está dada por:

$$U_0 = 2 + 0.534d \quad (1.2)$$

Donde d es el claro entre electrodos en mm y U_0 es la tensión de ruptura en kV . Esta ecuación puede aplicarse para distancias mayores a 250 mm y menores a 2500 mm. Para distancias menores a 250 mm el arreglo no es apropiado debido a la ausencia del régimen de descarga por streamers, y para distancias mayores a 2500 mm debido a que la linealidad de la tensión de ruptura contra la separación entre electrodos se

pierde para distancias mayores. El uso de este arreglo también está limitado para un intervalo de humedad h/δ desde 1.0 gr/m^3 hasta 13.0 gr/m^3 . Con estas condiciones de operación el error estimado es menor del 3%. Feser y Hughes [13] recomiendan que los electrodos deben estar hechos de latón de sección cuadrada de lados 20 mm y tener un eje común. Además la distancia entre el electrodo energizado a los objetos aterrizados y paredes debe ser mayor a 5 m. Para arreglos punta-plano U_0 es un valor estimado. K_I se determina como el producto de dos factores:

$$K_I = k_1 k_2 \quad (1.3)$$

k_1 es el factor de corrección por densidad relativa del aire:

$$k_1 = (\delta)^m \quad (1.4)$$

δ es la densidad relativa del aire:

$$\delta = \frac{b}{b_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (1.5)$$

b y t , son la presión barométrica (en kPa) y la temperatura (en $^{\circ}\text{C}$) a las condiciones atmosféricas presentes, mientras que b_0 y t_0 , son la presión barométrica y la temperatura a condiciones atmosféricas estándar (101.3 kPa y 20°C , respectivamente); una presión de 101.3 kPa corresponde a una altura de 760 mm en un barómetro de mercurio a 0°C . Si la altura del barómetro es H mm de mercurio, la presión en kPa es aproximadamente $b=0.1333H\text{kPa}$, aunque la corrección por temperatura con respecto a la altura de la columna de mercurio se considera despreciable [1].

k_2 es el factor de corrección por humedad absoluta definido como:

$$k_2 = k^w \quad (1.6)$$

k es un parámetro que depende del tipo de tensión de prueba y se puede obtener de la figura A del apéndice, o bien mediante las relaciones:

$$k = 1 + 0.014 \left[\frac{h}{\delta} - 11 \right] \text{ (para cd)} \quad (1.7)$$

$$k = 1 + 0.010 \left[\frac{h}{\delta} - 11 \right] \text{ (para impulso)} \quad (1.8)$$

$$k = 1 + 0.012 \left[\frac{h}{\delta} - 11 \right] \text{ (para ca)} \quad (1.9)$$

Siendo h la humedad absoluta medida en gr/m^3 , la cual se puede obtener de las tablas de vapor de la British Standard que se muestra en la figura B del apéndice. El valor de 0.014 (para corriente directa) se considera como el coeficiente de humedad absoluta; Boutlendj et al. [5, 8, 14, 15] consideran que éste tiene un valor de 1.2 $\%/gr/m^3$ cuando la ruptura es por streamers para arreglos punta-plano con tensiones de corriente directa y polaridad positiva. Feser y Schimid [16] toman éste valor igual a 1.1 $\%/gr/m^3$, para la misma configuración con tensiones de impulso. Por lo que se considera que dicho factor debe ser alrededor de 1.1 cuando el mecanismo que gobierna durante la ruptura, en arreglos punta-plano, es por streamers sin importar el tipo de tensión aplicada. Abraham y Prabhakar [17, 18] reportaron que éste coeficiente varía con la separación entre electrodos. Sin embargo, no existen investigaciones adicionales que confirmen esos resultados.

Los exponentes m y w dependen del tipo de predescarga y están en función del parámetro adimensional g :

$$g = \frac{U_B}{500L\delta k}$$

El valor de 500 se considera como el campo eléctrico de propagación de los streamers a condiciones estándar de humedad absoluta. Phelps y Griffiths [19] consideran que éste tiene un valor de 487 kV/m mientras que Allen et al. [15] mencionan que éste es de 524 kV/m. Consideran que campo eléctrico de propagación se puede obtener a través de la relación V_b/d (tensión de ruptura entre la separación del electrodo punta y el plano). U_B es la tensión de ruptura estimada o medida a las condiciones atmosféricas actuales, en kV, L es la trayectoria mínima de la descarga en m, δ es la densidad relativa del aire y k , como se mencionó anteriormente depende del tipo de tensión aplicada. Los exponentes m y w se obtienen de la figura C del apéndice; w también se puede calcular con la relación:

$$\begin{aligned} w &= g/(g - 0.2)/0.8 && \text{si } g < 1 \\ w &= 1 && \text{si } 1.0 < g < 1.2 \\ w &= (2 - g_0)/(0.66g) && \text{si } 1.2 < g < 2.0 \\ w &= 0 && \text{si } g > 2 \end{aligned}$$

Cómo se mencionó anteriormente la norma surge como resultado de una serie de investigaciones encabezadas por Pignini et al. [10] con tensiones de impulso y por maniobra; reportan que la tensión de ruptura está en función de la densidad relativa del aire, así como de la humedad, de la separación entre electrodos, del electrodo punta empleado, de la forma de onda y de la polaridad de la tensión aplicada. Proponen una corrección semi empírica basada en el hecho de que los factores de corrección son mayores cuando la descarga es gobernada principalmente por streamers positivos, mientras que éstos tienden a ser menores cuando están presentes

líderes o streamers negativos. Cuando $g < 1.0$, sólo líderes y streamers positivos están presentes. El efecto de la humedad sobre la tensión de flameo de aislamientos externos es pequeña cuando el líder llega a ser el que prevalece en la descarga; mientras que el efecto de la humedad es más grande cuando los streamers positivos prevalecen en la descarga, por lo que la influencia de la humedad se incrementa conforme la longitud del streamer positivo aumenta y la longitud del líder disminuye. Para el intervalo $1 < g < 1.2$, el proceso de descarga es principalmente gobernado por streamers positivos por lo que el exponente w se considera igual a 1. En el intervalo de $1.2 < g < 2.0$ el proceso de la descarga se caracteriza por la presencia de streamers positivos y negativos. Cuando la longitud del streamer positivo decrece y la del streamer negativo se incrementa, la influencia de la humedad disminuye. Finalmente para $g > 2.0$, la descarga generalmente ocurre sin el fenómeno de la predescarga, este es el caso para configuraciones de campo uniformes [20].

Geldenhuis [21] desarrolló un modelo empírico para tensiones de impulso por maniobra en polaridad positiva, el cual expresa el campo eléctrico de propagación de los streamers de acuerdo a la ecuación:

$$E_s = 489 \left[\delta^{1.2} + 1.3 \delta^{-0.17} \frac{h-11}{100} \right] \quad E_s = E_{s0} (k_1 + k_2)$$

Donde E_{s0} en kV/m es el campo eléctrico de propagación de los streamers en condiciones estándar. De acuerdo a esta ecuación la forma de corregir por humedad y densidad relativa es diferente al procedimiento de corrección que emplea la Norma IEC-60.

Calva y Espino [2] empleando un procedimiento similar al utilizado por Geldenhuis [21] proponen un modelo para obtener el campo eléctrico de propagación de los streamers para un arreglo punta cónica-plano a una altitud de 2240 msnm ($\delta = 0.77$)

con claros desde 0.20 m hasta 1.00 m y un intervalo de humedad de $5.9 < h < 14.2$ gr/m³. Demuestran que el procedimiento de corrección para tensiones de corriente directa a gran altitud es incorrecto ya que la diferencia entre los valores calculados y obtenidos es hasta de un 10%. El modelo propuesto es:

$$E_s = 500[k_1 + k_2]$$

donde:

$$k_1 = \delta^{1.4}, \quad k_2 = 1.3\delta^{0.83} \left[\frac{h-11}{100} \right]$$

E_s = campo eléctrico de propagación de los streamers, en kV/m

δ = densidad relativa del aire

h = humedad absoluta, en gr/m³

El modelo anterior ajusta mejor a los valores experimentales que los obtenidos al emplear la Norma Internacional IEC-60. La diferencia entre los valores de tensión de ruptura promedio que se obtuvieron experimentalmente y aquellos calculados con éste modelo son alrededor del 2.4%, aunque presenta errores de hasta el 6.5% para bajas humedades (<8 gr/m³). Aunque este procedimiento de corrección se puede emplear para otros electrodos con terminaciones diferentes, no considera el factor de claro. Por lo tanto en este trabajo se proponen factores de claro para dos electrodos punta distintos con la finalidad de iniciar nuevas investigaciones que lleven en un futuro a la utilización de dicho modelo para corregir tensiones de CD con cualquier configuración empleada.

La tabla 1 presenta de manera general un resumen sobre los resultados que obtuvieron diversos investigadores en arreglos punta-plano.

Tabla 1. Datos reportados por diversos investigadores a nivel del mar ($\delta=1.0$)

ref.	año	configuración	claro entre electrodos (m)	tensión aplicada	desviación estándar σ (%)	intervalo de humedad (gr/m^3)	coeficiente de humedad ($\%/ \text{gr}/\text{m}^3$)
[5]	1991	Punta-Punta	0.25-2.50	cd pol. positiva	<3	1.0-13.0	1.2
[8]	1992	Punta-Punta Punta-Plano	0.50-1.50 0.50-1.50	cd pol. positiva	<3 <2	4-32 3.0-13	1.4 1.2
[9]	1993	Punta-Punta Punta-Plano	0.50,1.0,1.50 0.20,0.40 0.50,1.0,1.50 0.20,0.40	cd pol. positiva negativa positiva negativa	0.5,0.25,1.5 1.2,2.2 2.0,1.0,1.5 1.2,2.2	2.0-28.0 8.0-40.0 2.0-28.0 8.0-40.0	1.30 ≈ 0 1.30 ≈ 0
[16]	1990	Punta-plano	0.20-1.0	Impulso positiva			1.1
[18]	1989	Punta-Punta Punta-Plano	0.05-0.25 0.05-0.25	cd pol. positiva negativa positiva negativa	--	12.0-24.0	0.52-1.22 0.31-2.35 0.40-2.15 1.34-3.76

1.4 ARREGLO EXPERIMENTAL.

El arreglo más común en investigaciones de la descarga eléctrica en aire, bajo condiciones ambientales en laboratorios de prueba e investigación, es el arreglo de electrodos punta-plano, ya que permite representar características reales de los sistemas eléctricos de potencia debido a que se produce una distribución de campo eléctrico altamente no uniforme entre el electrodo punta y el plano [22]. Por otro lado este arreglo presenta una desviación estándar menor de sus valores de ruptura en comparación con el arreglo punta-punta por lo cual puede ser una mejor alternativa para medir tensiones de corriente directa; además ofrece un intervalo mayor de linealidad [5, 8, 9]. En la presente tesis se utilizaron tres tipos de electrodos para llevar a cabo las pruebas de laboratorio con el fin de comparar sus

valores de tensión de ruptura, ya que al cambiar la geometría varía la distribución del campo eléctrico que existe entre el electrodo punta y el plano [23].

La figura 1.4.1 muestra el arreglo experimental completo utilizado durante las pruebas en el laboratorio de la ESIME–Zacatenco, perteneciente al IPN.

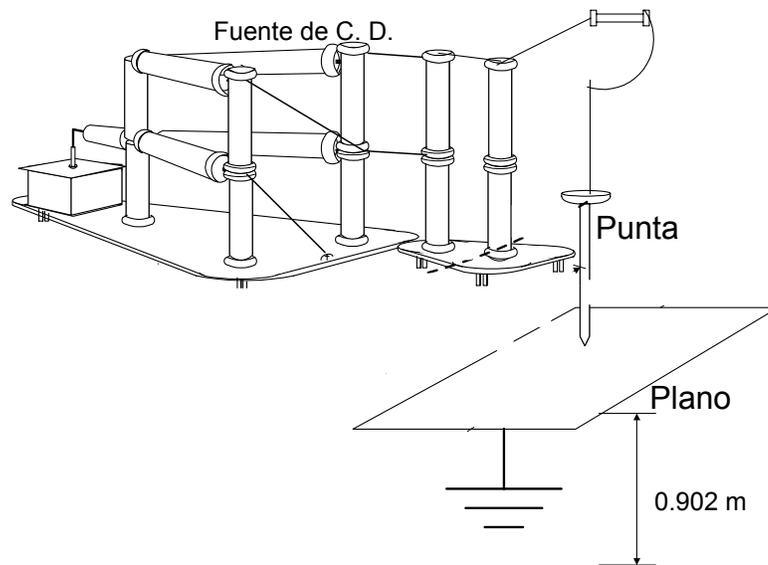


Figura 1.4.1 [24] Arreglo experimental empleado en las pruebas de laboratorio.

Debido a que la geometría de los electrodos es importante en la distribución del campo eléctrico se utilizaron tres tipos de electrodos, con el propósito de comparar los valores de tensión de ruptura para cada electrodo empleado y la influencia de la altitud y de la humedad absoluta sobre los mismos. Estos electrodos se conectaron a la fuente de alta tensión a través de una resistencia.

Los electrodos empleados (figura 1.4.2) para la realización de las pruebas fueron un electrodo con punta cónica y un electrodo con terminación semiesférica, ambos con 0.01 m de radio; además un electrodo en forma de barra rectangular de 0.02 m por lado. Éstos fueron hechos de latón. Se emplearon estos tres tipos de electrodos con el fin de comparar los valores obtenidos con aquellos reportados en la literatura.

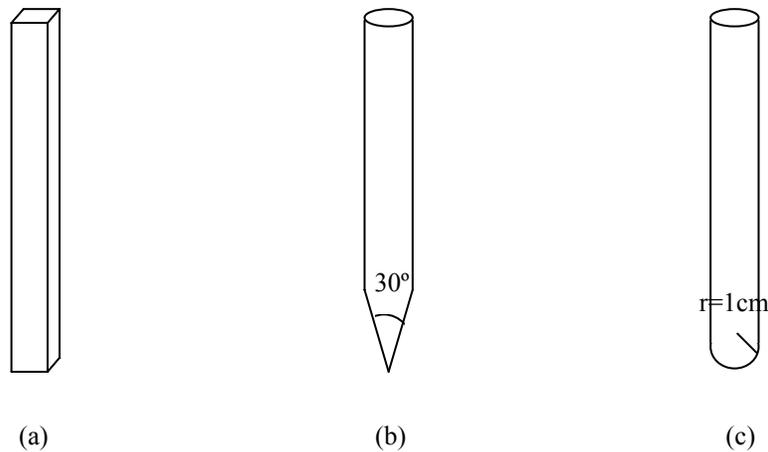


Figura 1.4.2 Tipos de electrodos empleados para las pruebas de laboratorio:
a)Punta cuadrada, b)Punta cónica y c)Punta semiesférica.

Los electrodos fueron hechos de latón porque no requieren ser reacondicionados antes o después de las pruebas ya que la función trabajo que posee el latón impide que la superficie de los electrodos llegue a erosionarse con facilidad.

El arreglo utilizado (punta–plano) se muestra en la figura 1.4.3, el plano está conectado a tierra y está construido con hierro negro en forma de lámina rectangular con dimensiones de 2.45 X 1.22 m². En un principio se llevo a cabo una simulación del campo eléctrico en los bordes del plano usando el paquete computacional ANSYS (apéndice B); esta simulación al igual que la realizada por Ramírez [25] mostró una fuerte concentración del campo eléctrico en los bordes del plano (mayor al 7% del campo eléctrico al centro del plano) para separaciones a partir de 0.60 m, lo que hace suponer que el impacto de la descarga eléctrica sería cerca de los bordes del plano y afectaría la trayectoria de la descarga así como el valor de la tensión de ruptura. Sin embargo, éste efecto jamás se observó en el laboratorio. En ambas simulaciones se consideraron campos Laplacianos ($\nabla^2V=0$) y no campos Poissonianos debido a que no se consideró el efecto de la carga espacial ya que no hay datos disponibles de ella. López Tapia [26] demostró que el impacto de la ruptura eléctrica para el claro de 0.50 m con la misma configuración y condiciones

atmosféricas, se aleja de la axial del electrodo punta y el plan una distancia máxima de 0.10 m. A nivel del mar, con un claro de 1.00 m, reportó que la distancia máxima a la axial fue de 0.21 m. Por lo tanto se consideró que no existió influencia de los bordes del plano sobre la tensión de ruptura.

La fuente de alta tensión de corriente directa se conectó al electrodo punta a través de una resistencia de aproximadamente $1\text{ M}\Omega$. Esta resistencia funciona como protección para la fuente de corriente directa, ya que ésta emplea diodos como rectificadores. De acuerdo con Allibone [27] la protección debe ser provista por una resistencia típicamente de $1\text{ M}\Omega$ entre el generador y el objeto de prueba.

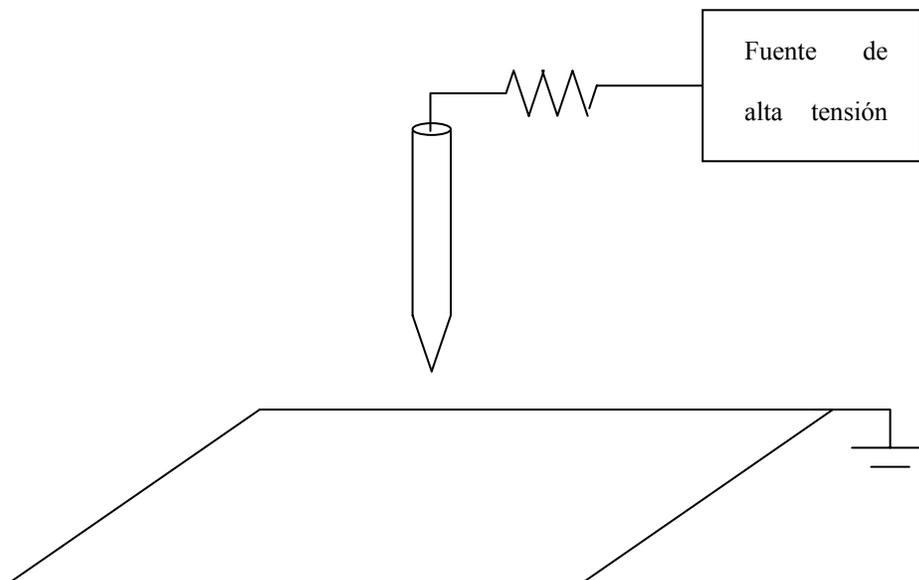


Figura 1.4.3 Arreglo punta cónica-plano empleado durante las pruebas de laboratorio.

La fuente de alta tensión empleada para las pruebas es un multiplicador de tensión Crockoft-Walton hasta 600 kV, del tipo cascada Ferranti LTD, con las siguientes características [28]: Tensión: 0 a 600 kV, corriente máxima: 10 mA, polaridad: Positiva y negativa y factor de rizo: 1.5%

La medición de tensión se llevó a cabo mediante la carátula de lectura digital ubicada en la consola de mandos de un divisor mixto marca Hipotronics de 400 k; este divisor esta en paralelo al divisor resistivo de la fuente que se encuentra conectado a la salida de la misma. El divisor resistivo se empleó para comparar los valores arrojados por el divisor mixto. La figura 1.4.4 muestra los divisores de tensión citados junto con el generador en cascada.

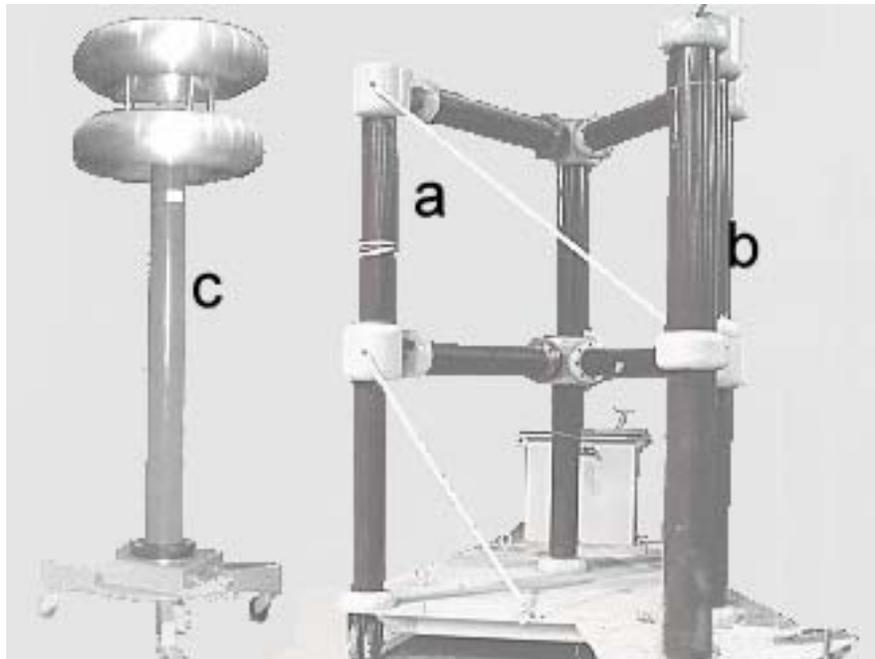


Figura 1.4.4 [24] (a) Fuente de alta tensión tipo cascada de hasta 600 kV. Divisores de tensión: (b) resistivo, (c) mixto.

Las pruebas se llevaron a cabo con polaridad positiva y polaridad negativa para los tres arreglos experimentales: Punta cónica–plano, punta cuadrada–plano y punta semiesférica–plano. Las pruebas se realizaron a una altitud de 2240 metros sobre el nivel del mar (msnm), en el laboratorio de alta tensión de la ESIME-Zacatenco perteneciente al Instituto Politécnico Nacional.

Para polaridad positiva el intervalo del claro fue de 0.20 m hasta 1.00 m, con incrementos de 0.20 m. Para polaridad negativa el intervalo de separación empleado fue desde 0.03 m hasta 0.36 m, con incrementos de 0.03 m. Las condiciones de operación se muestran en las tablas 1.4.1 y 1.4.2. Los claros máximos (1.00 m para polaridad positiva y 0.36 m para polaridad negativa) se determinaron por las limitaciones de la fuente de alta tensión. Con el propósito de observar a mayor detalle el comportamiento de la tensión de ruptura en polaridad negativa contra la separación entre electrodos se decidió emplear incrementos de 0.03 con la finalidad de tener por lo menos series de 10 datos.

El intervalo de humedad absoluta varió desde 5.40 gr/m³ hasta 14.5 gr/m³, dicha humedad se obtuvo utilizando las tablas de vapor-agua de la British Standard (Figura B del apéndice). La humedad relativa fue medida con un higrómetro convencional mientras que la tensión de ruptura fue medida por medio de un divisor mixto (figura 1.4.4 b). Cabe mencionar que no se empleo un intervalo de humedad mayor debido a que no se cuenta con una cámara controlada que permita variar las condiciones atmosféricas.

Tabla 1.4.1 Condiciones de operación registradas en polaridad positiva.

Electrodo punta	Intervalo de humedad	Intervalo del claro	Incremento del claro
Cónica	5.90–14.20 gr/m³	0.20–1.00 m	0.20 m
Cuadrada	5.80–14.50 gr/m³	0.20–1.00 m	0.20 m
Semiesférica	5.40–14.50 gr/m³	0.20–1.00 m	0.20 m

Tabla 1.4.2 Condiciones de operación registradas en polaridad negativa.

Electrodo punta	Intervalo de humedad	Intervalo del claro	Incremento del claro
Cónica	8.30–14.20 gr/m³	0.03–0.36 m	0.03 m
Cuadrada	8.30–14.10 gr/m³	0.03–0.30 m	0.03 m
Semiesférica	6.50–14.12 gr/m³	0.03–0.36 m	0.03 m

Para determinar el número óptimo de disparos, en un principio se optó por series de 10 disparos y posteriormente de 20 disparos. El promedio de los valores de tensión de ruptura para la serie de 20 disparos así como la desviación estándar de los mismos se comparó con aquellos obtenidos con 10 disparos. Se encontró una diferencia pequeña entre los valores de ambas series (máximo 0.2% para la tensión de ruptura y 0.1% para la desviación estándar) por lo que se optó por emplear series de 10 disparos ya que no existió una gran diferencia al incrementar el número de disparos. Para el arreglo punta semiesférica-plano, en polaridad positiva, se emplearon series de 20 disparos esto debido a la gran dispersión que presentan sus valores de tensión de ruptura. Los valores de tensión de ruptura se registraron y se calculó su valor promedio; la tensión de ruptura se aplicó al electrodo punta a través de una resistencia y ésta se incrementó gradualmente desde 0 kV hasta que la ruptura ocurrió tomando un tiempo aproximado de un minuto.

Capítulo 2

TENSIONES DE RUPTURA EN POLARIDAD POSITIVA

2.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se analiza el modelo propuesto por Calva y Espino [2] contra los valores de ruptura obtenidos experimentalmente para los arreglos punta cuadrada-plano [28] y punta semiesférica-plano, en polaridad positiva.

Se proponen factores de claro para los arreglos punta cuadrada-plano y punta semiesférica-plano, a partir del modelo propuesto en [2]. Se demuestra que con $\delta=0.77$ el valor promedio de la tensión de ruptura es aproximadamente de la misma magnitud sin importar si el perfil del electrodo empleado es punta cónica, punta cuadrada o punta semiesférica para distancias mayores o iguales a 0.80 m.

Se evalúa el efecto de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura, se analiza la influencia de la altitud sobre el electrodo punta empleado y se comparan los valores experimentales con el modelo de [2], considerando los factores de claro propuestos; finalmente se reporta la desviación estándar de los valores experimentales, con el fin de seleccionar el arreglo y modelo más adecuado para ser utilizado como vóltmetro de corriente directa en polaridad positiva.

2.2 PUNTA CÓNICA-PLANO

Geldenhuis [21] propuso la siguiente expresión para obtener el campo eléctrico de propagación de los streamers con tensiones de impulso por maniobra:

$$E_s = 489 \left[\delta^{1.2} + 1.3\delta^{-0.17} \frac{h-11}{100} \right] \quad (2.2.1)$$

Siendo $k_1 = \delta^{1.2}$ y $k_2 = 1.3\delta^{-0.17}(h-11)/100$

La ecuación 2.2.1 implica:

$$E_s = E_{s0}(k_1 + k_2) \quad (2.2.2)$$

E_s es el campo eléctrico de propagación de los streamers, en kV/m .

δ es la densidad relativa del aire y h es la humedad absoluta en gr/m^3 . E_{s0} es el campo eléctrico de propagación de los streamers a condiciones atmosféricas estándar.

Con ésta ecuación se puede calcular el campo eléctrico de propagación de los streamers con tensiones de impulso por maniobra a cualquier condición atmosférica.

Calva y Espino [2] demostraron que el procedimiento de corrección empleado por la Norma Internacional IEC-60 es inadecuado para altitudes superiores a 2000msnm. Mostraron que la suposición de que el campo eléctrico de propagación de los streamers varía linealmente con la altitud es incorrecta para altitudes mayores a 2000 msnm con tensiones de corriente directa. Esto lo demostraron con el error obtenido entre los valores calculados con la norma y los valores experimentales que difieren hasta en un 10%. Empleando un procedimiento similar a [21] con los resultados obtenidos experimentalmente a una altitud de 2240 msnm, utilizando un arreglo punta cónica-plano y tensiones de corriente directa con polaridad positiva, obtuvieron el siguiente ajuste para calcular el campo eléctrico de propagación de los streamers para el arreglo y condiciones citados:

$$E_s = 500 \left[\delta^{1.4} + 1.3 \delta^{0.83} \frac{h-11}{100} \right] \quad (2.2.3)$$

E_s es el campo eléctrico de propagación de los streamers positivos, definido como la relación de la tensión de ruptura promedio a la separación mínima entre electrodos. La figura 2.2.1 muestra el campo eléctrico de propagación de los streamers para éste arreglo a 2240 msnm. Calculando E_s con 2.2.3 se observa que a condiciones estándar de humedad absoluta y de densidad relativa del aire, el campo eléctrico de propagación que se obtiene es de 500 kV/m; este valor es similar al reportado por Allen et al. [9] con esas condiciones atmosféricas (490 kV/m).

La ecuación 2.2.3 se puede describir de la siguiente manera para calcular la tensión de ruptura:

$$V_b = 500d[k_1 + k_2] \quad (2.2.4)$$

d es la distancia mínima entre el electrodo punta y el plano medida en m mientras que V_b es la tensión de ruptura en kV ; al igual que la ecuación propuesta por Geldenhuys, el modelo de la ecuación 2.2.4 implica que el procedimiento de corrección por densidad relativa del aire y humedad absoluta es distinto al empleado por la Norma Internacional IEC-60.

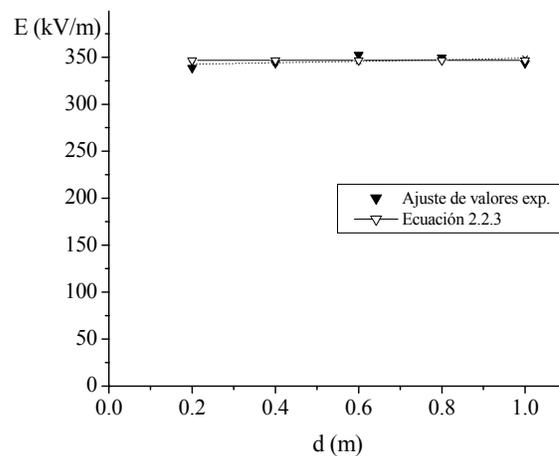


Figura 2.2.1 Campo eléctrico de propagación de los streamers calculado con el modelo de la ecuación 2.2.3 para el arreglo punta cónica-plano en polaridad positiva.

La tabla 2.2.1 muestra los valores del campo de propagación obtenidos en [2] y su diferencia con aquellos obtenidos con el modelo de la ecuación 2.2.3, para distintos valores de humedad absoluta y claros. Se observa de la tabla 2.2.1 que los valores obtenidos con el modelo 2.2.3 presentan errores menores al 4.4 % respecto a los experimentales para humedades mayores a 8 gr/m^3 . El procedimiento de corrección definido por el modelo 2.2.4 ajusta mejor a los valores experimentales que el empleado por la IEC-60. Considerando que la Norma permite errores hasta del 5%, se concluye que dicho modelo es válido para corregir tensiones de corriente directa.

Tabla 2.2.1 (tomada de referencia 2) Campo eléctrico de propagación de los streamers obtenido con la relación $V_b \text{ exp}/d$ y la ecuación 2.2.3 para el arreglo punta cónica-plano con polaridad positiva.

h (gr/m³)	d (m)	Ec 2.2.3 (kV/m)	V_b/d (kV/m)	Dif. (%)
5.9	0.8	309.5	320.12	3.4
6.0	1.0	301.0	320.64	6.5
6.1	0.6	306.6	321.17	4.7
6.5	0.4	333.2	323.16	2.9
7.1	1.0	329.5	326.39	0.9
7.8	0.8	351.9	330.05	6.2
8.0	0.4	337.2	331.10	1.8
8.4	1.0	338.0	333.19	1.4
8.6	0.6	322.8	334.23	3.5
8.9	0.8	350.0	335.80	4.0
9.3	0.2	353.5	337.89	4.4
9.7	0.6	345.6	339.98	1.6
10.0	0.4	341.3	341.55	0.1
10.8	1.0	348.0	345.73	0.6
11.0	0.8	346.9	346.78	0.03
11.5	0.2	334.5	349.39	4.4
11.9	0.6	361.0	351.48	2.6
12.0	0.4	346.0	352.00	1.7
13.8	0.8	356.5	361.41	1.3
14.2	1.0	354.5	363.50	2.5

De acuerdo a la desviación estándar de los valores de ruptura obtenidos (figura 2.2.2) y a los valores de desviación estándar permitidos por la Norma, el arreglo punta cónica-plano es una herramienta confiable en la medición de tensiones en corriente directa a gran altitud; Éstos valores de desviación estándar concuerdan con los reportados en la literatura a nivel del mar[8, 9].

Se observa de manera general, que la desviación estándar de los valores de ruptura tienden a disminuir conforme la separación entre el electrodo punta y el plano aumenta.

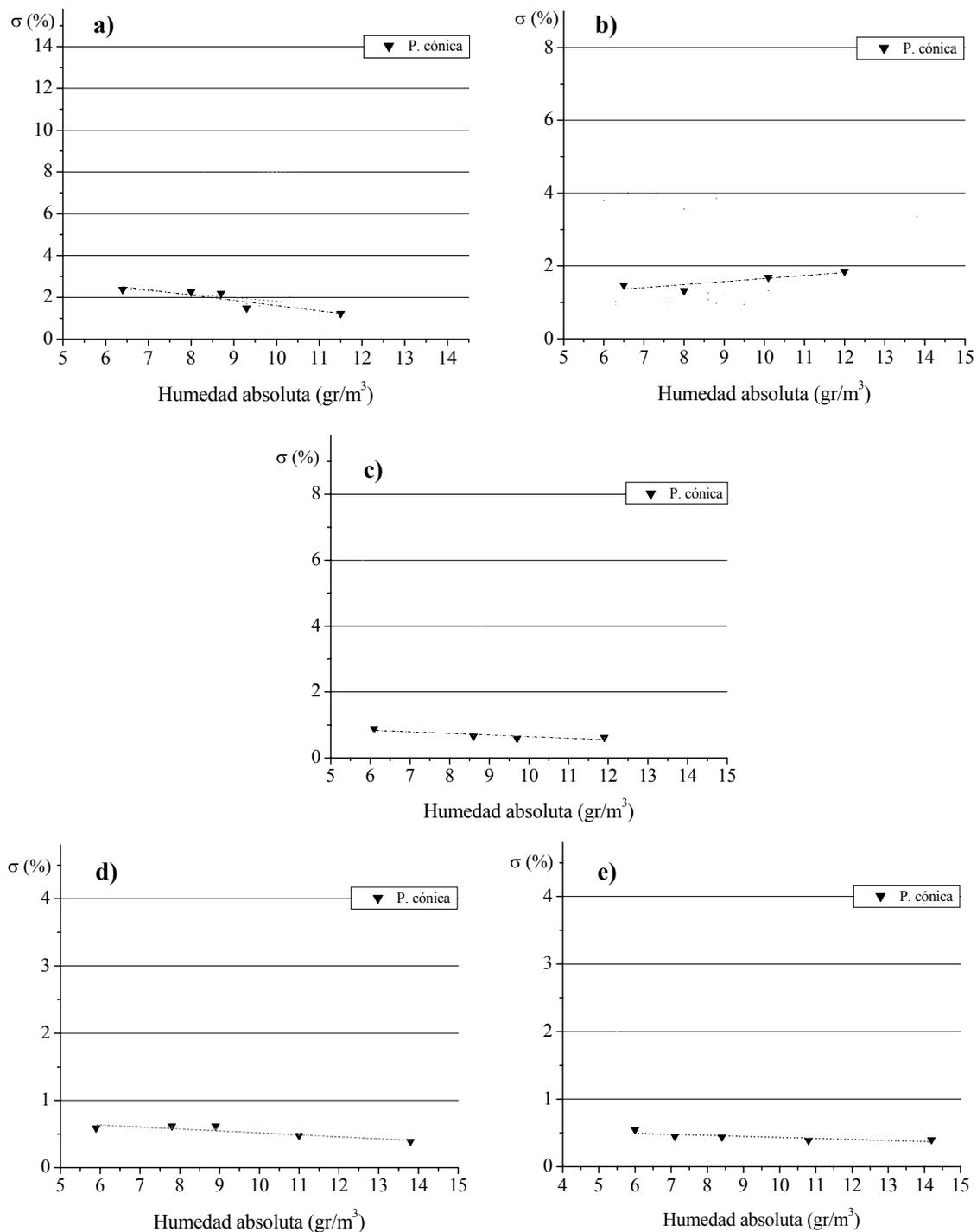


Figura 2.2.2 Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta cónica-plano para los claros de a) 0.20 m, b) 0.40 m, c) 0.60 m, d) 0.80 m y e) 1.00 m.

2.3 PUNTA CUADRADA-PLANO.

A partir del modelo obtenido en [2] y de los valores de tensión de ruptura para una altitud de 2240 msnm [29], para el arreglo punta cuadrada-plano, se determinó el factor de claro de electrodo para este arreglo con tensiones de corriente directa en polaridad positiva; las tablas 2.3.1 y 2.3.2 muestran los valores promedio de tensión de ruptura reportados y su diferencia con aquellos calculados empleando la ecuación 2.2.4. Conforme la separación entre el electrodo punta y el plano es mayor el error tiende a ser más pequeño y para claros más cortos el error es mayor; así tenemos que para el claro de 0.20 m éste presenta una diferencia entre los valores experimentales y los calculados con la ecuación 2.2.4 de hasta 19.36 %, mientras que para la separación de 1.00 m el error máximo es del 5.41 % para humedades mayores 8 gr/m³.

Tabla 2.3.1 Tensiones de ruptura experimentales y calculadas con la ecuación 2.2.4 para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva para distintos puntos de humedad absoluta.

Claro = 1.00m				Claro = 0.80m				Claro = 0.60m			
h (gr/m ³)	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif. (%)	h (gr/m ³)	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif. (%)	h (gr/m ³)	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif. (%)
6.0	305.0	320.62	-5.12	5.8	251.0	255.66	-1.86	6.1	194.6	192.69	0.98
7.6	352.0	328.99	6.54	7.9	288.0	264.45	8.18	7.9	221.5	198.34	10.46
8.0	341.0	331.09	2.91	8.2	268.2	265.71	0.93	8.7	216.8	200.85	7.36
8.3	325.0	332.65	-2.36	8.4	280.0	266.54	4.81	8.8	208.8	201.16	3.66
8.6	343.0	334.22	2.56	8.9	280.0	268.64	4.06	9.1	214.2	202.10	5.65
9.3	349.8	337.89	3.41	9.2	283.5	269.89	4.80	9.8	219.0	204.30	6.71
9.5	347.6	338.93	2.49	9.7	284.5	271.98	4.40	11.6	221.5	209.95	5.21
11.4	353.8	348.88	1.39	11.4	294.8	279.10	5.33	13.2	222.8	214.98	3.51
14.2	366.4	363.53	0.78	14.5	299.8	292.08	2.58	--	--	--	--

Tabla 2.3.2 Tensiones de ruptura experimentales y calculadas con la ecuación 2.2.4 para el arreglo punta cuadrada–plano en polaridad positiva para distintos puntos de humedad absoluta.

Claro = 0.40m				Claro = 0.20m			
h (gr/m ³)	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif. (%)	h (gr/m ³)	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif. (%)
6.3	133.4	128.88	3.39	6.4	79.4	64.54	18.71
7.6	149.3	131.60	11.86	7.9	82.1	66.11	19.47
8.6	142.2	133.69	5.98	9.1	82.2	67.37	18.04
8.8	145.6	134.11	7.89	9.3	79.4	67.58	14.89
9.0	144.1	134.53	6.64	9.6	83.1	67.89	18.30
9.4	145.9	135.36	7.22	10.3	84.4	68.62	18.69
9.5	150.0	135.57	9.62	11.7	84.7	70.09	17.25
10.1	146.4	136.83	6.54	--	--	--	--
11.8	148.5	140.39	5.46	-	--	--	--
14.2	151.5	145.41	4.02	-	--	--	--

La figura 2.3.1 muestra los valores de tensión de ruptura experimentales [29] para el arreglo punta cuadrada–plano en comparación con los valores calculados empleando 2.2.4, para distintos claros entre electrodo punta y plano en función de la humedad absoluta.

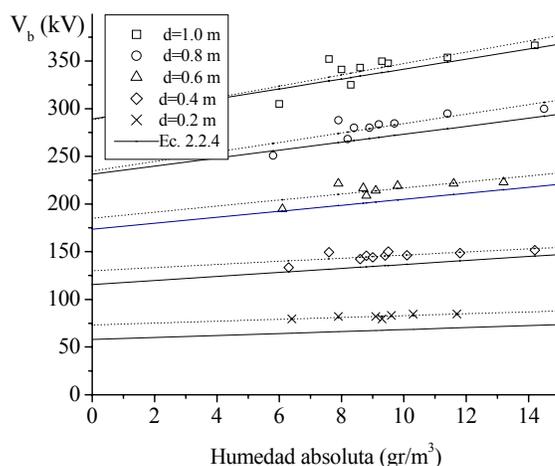


Figura 2.3.1 (Reproducida de referencia [2]). Tensiones de ruptura reportadas y calculadas con 2.2.4, para el electrodo de punta cuadrada con polaridad positiva en función de la humedad absoluta.

Se puede observar a partir de la figura 2.3.1 que la magnitud de la tensión de ruptura tiende a incrementarse al aumentar la humedad absoluta; esto debido a que el incremento en la humedad absoluta ocasiona que el aire, como medio aislante, tienda a ser más electronegativo. Por lo tanto, el coeficiente de captura (η) se incrementa y el coeficiente efectivo de ionización (γ) disminuye. Por lo tanto, es necesario incrementar la tensión aplicada para que el coeficiente de ionización (α) aumente y con esto el coeficiente efectivo de ionización para que la descarga disruptiva se pueda llevar a cabo [7, 30].

De la figura 2.3.2 se observa que para una densidad relativa del aire de 0.77 (2240 msnm) a condiciones estándar de humedad absoluta el campo de propagación de acuerdo con 2.2.3 debería ser igual a un valor constante de 346.78 kV/m. Sin embargo, el campo de propagación para el electrodo de punta cuadrada, varía de acuerdo al claro entre electrodos, y para claros a partir 0.60 m este tiende a un valor promedio de 358 kV/m. Este fenómeno ha sido reportado anteriormente en arreglos punta-punta por Allibone y Saunderson [31]. De acuerdo con Espino [32] éste fenómeno no se presenta para el electrodo de punta cónica ya que el campo de propagación calculado para este arreglo con claros a partir de 0.20 m hasta 1.00 m es de 346.78 kV/m, es decir, no varía con la separación entre electrodos. Por lo tanto la ecuación 2.2.3 es válida para dicho electrodo punta; mientras que el electrodo de punta cuadrada presenta una dependencia del campo de propagación con respecto al claro, por lo que el perfil del electrodo punta para separaciones cortas ($<0.50\text{m}$) es un parámetro importante para determinar el valor del campo de propagación [9].

Para cada claro se hizo un ajuste de la tensión de ruptura en función de la humedad. A partir de estos ajustes se calculo la tensión de ruptura con $h=11 \text{ gr/m}^3$ (V_{b11}). La figura 2.3.2 muestra el comportamiento del campo de propagación calculado ($E_{s11}=V_{b11}/d$) para el arreglo punta cuadrada-plano en función del claro así como el obtenido con el modelo definido por la ecuación 2.2.3 con $h=11 \text{ gr/m}^3$.

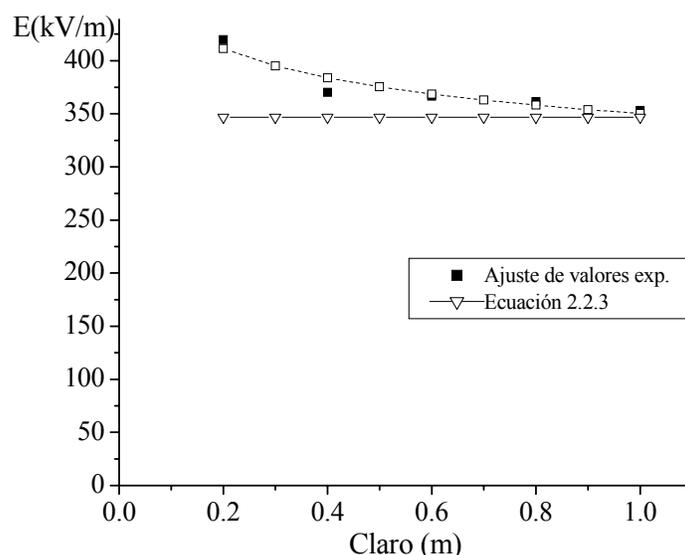


Figura 2.3.2 Campo eléctrico de propagación de los streamers calculado con 2.2.3 y el obtenido mediante el ajuste de los datos experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva con $h=11.00 \text{ gr/m}^3$.

En la tabla 2.3.3 se reportan los valores del campo de propagación calculado con la ecuación 2.2.3 en función del claro y el obtenido con el ajuste de los valores experimentales (E_{s11}); también se muestra el factor de claro por el cual debe multiplicarse el modelo descrito en la ecuación 2.2.3 para obtener el campo de propagación de los streamers para el electrodo de punta cuadrada en polaridad positiva. La figura 2.3.3 muestra el comportamiento del factor de claro (definido como la relación del campo de propagación para el electrodo de punta cuadrada al campo de propagación obtenido con la ecuación 2.2.3) en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.

Tabla 2.3.3 Factor de para la configuración punta cuadrada-plano a condiciones estándar de humedad absoluta.

Claro (m)	E_{s11} (V_{b11}/d)	Ecuación 2.2.3	Factor de claro
0.20	419.77	346.78	1.21
0.40	370.31	346.78	1.07
0.60	366.65	346.78	1.06
0.80	361.71	346.78	1.04
1.00	353.21	346.78	1.02

De acuerdo al comportamiento mostrado en la figura 2.3.3 se propone el siguiente factor de claro para la configuración punta cuadrada-plano:

$$S = 1.01d^{0.10} \quad (2.3.1)$$

Por lo tanto el campo eléctrico de propagación de los streamers para esta configuración se calcula con 2.2.3 aplicándole el factor de claro:

$$E = 500[k_1 + k_2]S \quad (2.3.2)$$

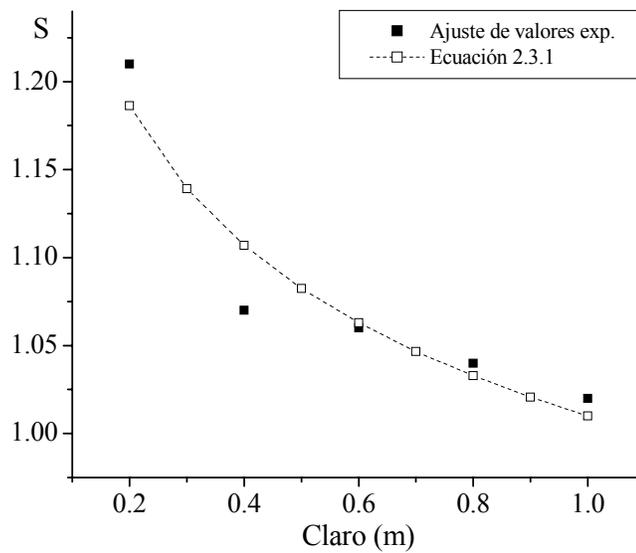


Figura 2.3.3 Factor de claro para obtener el campo eléctrico de propagación para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva a condiciones estándar de humedad absoluta.

La tabla 2.3.4 muestra el campo de propagación calculado en función del claro y los valores obtenidos empleando el modelo de la ecuación 2.3.2. La diferencia máxima entre ambos es de 3.63%.

Tabla 2.3.4 Campo eléctrico de propagación de los streamers calculado con 2.3.2 y el obtenido mediante el ajuste de los datos experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad

Claro (m)	E_{S11} (kV/m)	Ecuación 2.3.2	Dif (%)
0.20	419.77	411.40	1.99
0.40	370.31	383.75	3.63
0.60	366.65	368.67	0.55
0.80	361.71	358.12	0.99
1.00	353.21	350.30	0.82

Tomando como referencia las tensiones de ruptura reportadas por Peschke [33], para el arreglo punta cuadrada-plano se obtuvo el campo de propagación para distintos claros a condiciones estándar de humedad absoluta dados en la tabla 2.3.5. El campo eléctrico de propagación disminuye al aumentar el claro, lo cual concuerda con los valores obtenidos en el presente trabajo.

Tabla 2.3.5 Tensiones de ruptura y campo de propagación para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva para separaciones entre el electrodo punta y el plano a condiciones atmosféricas estándar [33].

Claro (m)	V_b (kV)	E (kV/m)
0.20	115	575
0.40	215	538
0.60	315	525
0.80	415	519

La tensión de ruptura de acuerdo a la figura 2.3.1, de un arreglo punta cuadrada-plano es diferente al arreglo punta cónica-plano para separaciones menores a <0.8 m; esto debido a que al cambiar la geometría del electrodo se altera la distribución del campo eléctrico existente en el claro de la geometría del arreglo empleado (campo eléctrico entre el electrodo punta y el plano) [22]. La tensión de ruptura de acuerdo a la misma figura, también es función del claro entre electrodos [9]. A partir de la tabla 2.3.3 se observa que a medida que la separación entre electrodos es mayor, la magnitud del campo de propagación del streamer positivo tiende a ser del mismo valor (para claros a partir de 0.80 m) sin importar si el electrodo empleado es de punta cuadrada o bien de punta cónica. Este efecto ha sido reportado anteriormente [8, 9, 34], aunque los investigadores concluyen que para claros a partir de 0.50 m la magnitud del campo de propagación citado es aproximadamente del mismo valor promedio (diferencia máxima del 5%) sin importar el perfil del electrodo punta empleado y por lo tanto la magnitud de la tensión de ruptura tiende a ser del mismo valor.

El modelo 2.2.4 al incluir el factor de claro obtenido se utiliza para calcular la tensión de ruptura para el arreglo punta cuadrada-plano en polaridad positiva:

$$V_b = 500d[k_1 + k_2]S \quad (2.3.3)$$

En las tablas 2.3.6 y 2.3.7 y la figura 2.3.4 se muestran los promedios de las tensiones de ruptura obtenidos experimentalmente y los calculados con 2.3.3 así como su diferencia en función de la humedad absoluta y del claro. Se observa que aplicando el factor de claro dado por 2.3.1 los valores calculados presentan un error menor que los calculados con 2.2.4. Para el claro de 1.00m la diferencia máxima es de 3.17%, mientras que para la separación entre electrodos de 0.20m ésta es de 3.54% para humedades mayores a 8 gr/m³.

Tabla 2.3.6 Valores de tensión de ruptura promedio obtenidos experimentalmente y calculados con 2.3.3 para el arreglo punta cuadrada-plano con polaridad positiva para distintos puntos de humedad absoluta h para claros de 1.00 m, 0.80 m y 0.60 m

Claro = 1.00m				Claro = 0.80m				Claro = 0.60m			
h	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h	V _b exp (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)
6.6	305.0	322.55	-5.76	5.8	251.0	262.96	-4.76	6.1	194.6	204.81	-5.25
7.6	352.0	331.42	5.85	7.9	288.0	272.48	5.39	7.9	221.5	210.82	4.82
8.0	341.0	333.63	2.16	8.2	268.2	273.83	-2.10	8.7	216.8	213.49	1.53
8.3	325.0	335.29	-3.17	8.4	280.0	274.74	1.88	8.8	208.8	213.82	-2.41
8.6	343.0	336.96	1.76	8.9	280.0	277.01	1.07	9.1	214.2	214.82	-0.29
9.3	349.8	340.83	2.56	9.2	283.5	278.37	1.81	9.8	219.0	217.16	0.84
9.5	347.6	341.94	1.63	9.7	284.5	280.63	1.36	11.6	221.5	223.17	-0.75
11.4	353.8	352.47	0.38	11.4	294.8	288.34	2.19	13.2	222.8	228.51	-2.56
14.2	366.4	367.98	-0.43	14.5	299.8	302.38	-0.86	-	-	-	-

Para el claro de 0.40 m la diferencia máxima es de 4.75% también para humedades mayores a 8 gr/m³; Ya que estos errores se encuentran en el intervalo permitido por la misma (hasta 5%) el modelo puede emplearse para valores de humedad absoluta mayores a 8 gr/m³

Tabla 2.3.7 Valores de tensión de ruptura obtenidos experimentalmente y calculados empleando el modelo de la ecuación 2.3.3 para el arreglo punta cuadrada-plano con polaridad positiva, en función de la humedad absoluta h para claros de 0.40 m y 0.20 m

Claro = 0.40 m				Claro = 0.20 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)	H(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)
6.3	133.5	141.06	-5.66	6.4	79.40	76.57	3.56
7.6	149.3	145.67	2.43	7.9	82.10	78.43	4.47
8.6	142.2	147.98	-4.07	9.1	82.20	79.92	2.77
8.8	145.6	148.45	-1.96	9.3	79.45	80.17	-0.97
9.0	144.1	148.91	-3.34	9.6	83.10	80.54	3.08
9.4	145.9	149.84	-2.70	10.3	84.40	81.41	3.54
9.5	150.0	150.07	-0.05	11.7	84.70	83.15	1.83
10.1	146.4	151.46	-3.46	-	-	-	-
11.8	148.5	155.40	-4.64	-	-	-	-
14.2	151.5	158.69	-4.75	-	-	-	-

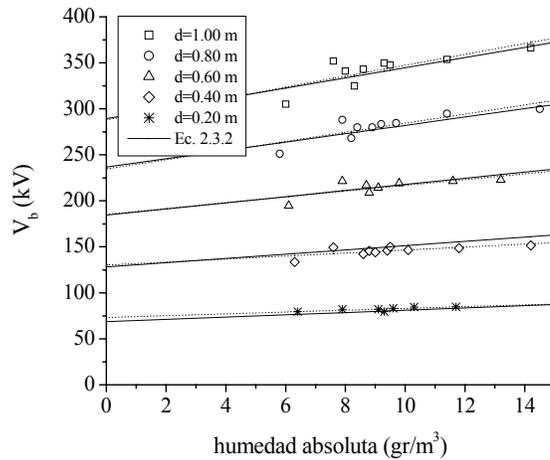


Figura 2.3.4 Tensiones de ruptura promedio obtenidas experimentalmente y calculadas con 2.3.3 para el arreglo punta cuadrada-plano en función de la humedad absoluta y del claro entre electrodos.

De acuerdo a fotografías estáticas tomadas por Robledo y Calva [3], sugieren que el mecanismo de descarga fue por líder para las separaciones entre el electrodo punta y el plano de 1.00 y 0.80 m; para los claros de 0.20 y 0.40 m el mecanismo de la descarga fue por streamer, mientras que para la separación interelectrónica de 0.60 m ambos tipos de descarga coexistieron. Isa [34] y Suzuki et al.[35], reportan la existencia de streamers, líder y arco transitorio(chispa), durante el proceso de ruptura con tensiones de corriente directa en polaridad positiva. Para evaluar el efecto de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura se empleará el siguiente coeficiente de humedad definido como [15]:

$$\frac{k_h}{100} = \left(\frac{E_s - E_{s0}}{E_{s0}} \right) \left(\frac{1}{h - h_0} \right) \quad (2.3.4)$$

donde E_s es el campo eléctrico de propagación de los streamers a cualquier humedad h , E_{s0} es el campo de propagación a un valor de h_0 igual a 11.00 gr/m^3 y k_h es el coeficiente de humedad en $\%/ \text{gr/m}^3$; esto es, cuanto disminuye la tensión de ruptura en porcentaje por cada gr/m^3 de humedad absoluta tomando como referencia los valores de campo de propagación a 11 gr/m^3 . Varios autores [5, 9, 14, 15, y 16] han

demostrado que cuando está presente un coeficiente de humedad alrededor de 1.1 % indica que la ruptura es por streamers. Empleando 2.3.4 se obtiene que el coeficiente de humedad para el electrodo de punta cuadrada para los claros de 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 y 1.00 m, son: 1.16, 1.07, 1.39, 1.61 y 1.59 %/gr/m³, respectivamente. De acuerdo a estos coeficientes de humedad para los claros de 0.20 y 0.40 m hacen suponer que el mecanismo de descarga es por streamer. Para separaciones mayores el mecanismo ya no es únicamente por streamer, lo cual es confirmado por las fotografías estáticas reportadas anteriormente [3]. Abraham y Prabhakar [18], empleando un electrodo punta similar y separaciones entre electrodos de 0.05 a 0.25 m reportan que el coeficiente de humedad para el claro entre electrodos de 0.20 m tiene un valor que oscila entre 0.65 y 2.15, dependiendo de la temperatura. Demuestran que en separaciones cortas (<0.25 m), la humedad absoluta tiene un efecto más severo sobre la tensión de ruptura en polaridad negativa que en polaridad positiva, lo cual se ve reflejado en las curvas del coeficiente de humedad contra el claro entre electrodos, donde la pendiente de estas curvas es más pronunciada en polaridad negativa. Sin embargo, es importante mencionar que el intervalo de temperatura en el cual llevaron a cabo las pruebas de laboratorio osciló entre 32 y 37°C, mientras que en este trabajo las pruebas fueron realizadas en el intervalo de 17 a 23°C. Además, no existen trabajos adicionales que confirmen sus resultados.

La figura 2.3.5 muestra la variación del coeficiente de humedad absoluta en función de la separación entre el electrodo punta y el plano; puede observarse que el coeficiente de humedad absoluta es, en promedio, igual a 1.1 %/gr/m³, para los claros de 0.20 y 0.40 m; para las separaciones de 0.60, 0.80 y 1.00 m éste es (en promedio) de 1.53 %/gr/m³. La Norma IEC-60, considera que los factores de corrección deben ser menores cuando el proceso de la ruptura no es por streamer. Sin embargo, la figura 2.3.5 muestra que el efecto de la humedad es mayor aún cuando el proceso de descarga que domina es distinto al del streamer. Al igual que la

suposición de que el campo de propagación varía linealmente con la altitud, la consideración de que el factor de corrección por humedad absoluta es menor ante la ausencia de streamers positivos es inválida para grandes altitudes.

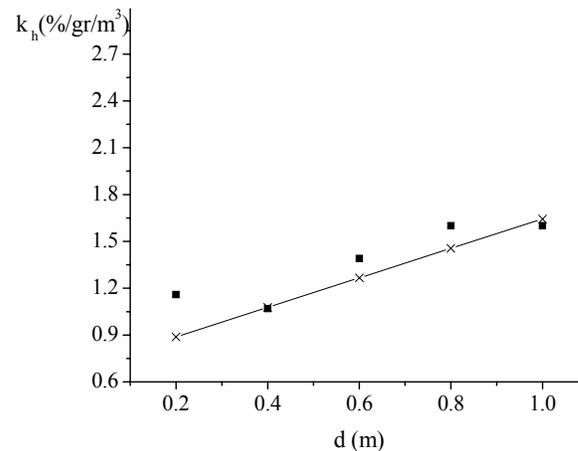


Figura 2.3.5 Efecto de la separación entre electrodos sobre el coeficiente de humedad para el arreglo punta cuadrada–plano en polaridad positiva.

Allen et al. [9] reportan que el incremento en la tensión de ruptura al aumentar el claro entre electrodos es de forma lineal (figura 2.3.6) para arreglos punta-punta; dicha característica resulta del hecho que la ruptura es determinada por el paso de los streamers positivos desde el ánodo, los cuales se aproximan al electrodo negativo, desde el cual streamers negativos de longitud más corta llegan a formarse. Ya que el streamer positivo domina, la tensión a la cual la ruptura ocurre es determinada por el producto del campo eléctrico de propagación del streamer positivo y su longitud, más una componente más pequeña debida a los streamers negativos. Debido a que los streamers negativos requieren un campo altamente no uniforme en el cátodo para su formación, en arreglos punta plano la tensión de ruptura únicamente se determina por el campo de propagación del streamer positivo y su longitud [8 y 9]. Por lo tanto la ruptura en arreglos punta-plano es de menor magnitud en comparación con los arreglos punta-punta, además de que sus límites de linealidad de tensión de ruptura contra claro son mayores.

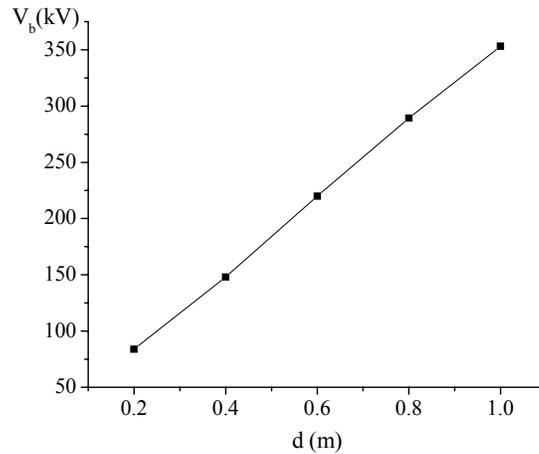


Figura 2.3.6 Tensión de ruptura en función del claro entre electrodos.

La figura 2.3.7 muestra la desviación estándar de los valores de ruptura experimentales. Como puede observarse, los valores presentan una desviación estándar menor al 2% para todos los claros en estudio. La dispersión de los valores de ruptura reportados para el arreglo punta cuadrada-plano, están acorde a los publicados por Allen et al.[8 y 16]; obtienen que la desviación estándar de los valores de tensión de ruptura para este arreglo punta-plano son menores al 2% para claros desde 0.5 hasta 1.5 m, para el intervalo de humedad absoluta de 4 a 32 gr/m³. Por lo tanto el arreglo punta cuadrada-plano es una herramienta confiable en la medición de altas tensiones de corriente directa con polaridad positiva tanto a bajas como a grandes altitudes. Al igual que el arreglo punta cónica-plano, el arreglo punta cuadrada-plano presenta características similares en las gráficas de desviación estándar contra humedad absoluta y claro entre el electrodo punta y el plano.

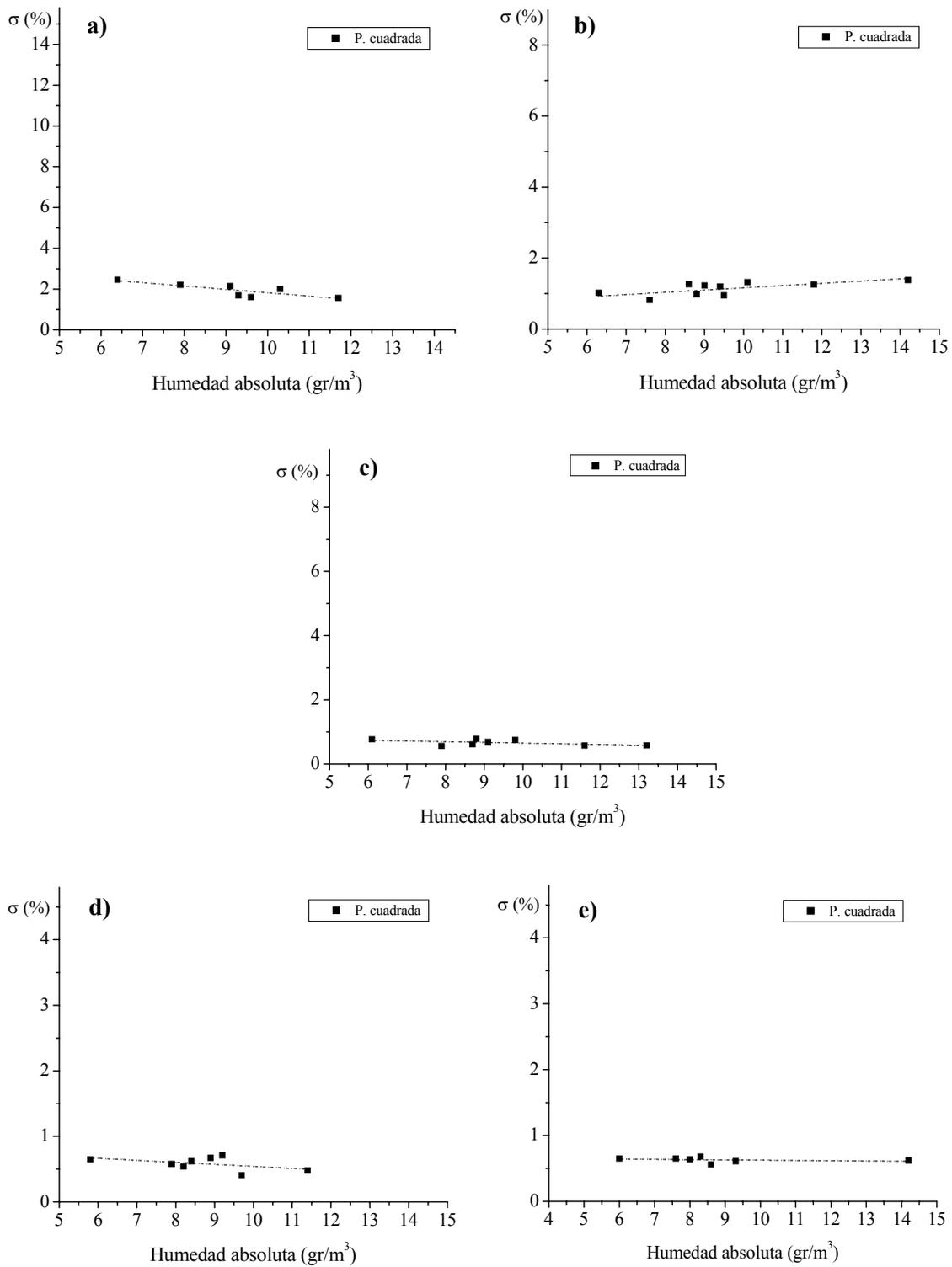


Figura 2.3.7 Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta cuadrada-plano para los claros de a) 0.20 m, b) 0.40 m, c) 0.60 m, d) 0.80 m y e) 1.00 m.

2.4 PUNTA SEMIESFÉRICA–PLANO.

Los resultados obtenidos experimentalmente para el arreglo punta semiesférica–plano en polaridad positiva en función de la humedad absoluta y su diferencia con aquellos calculados con 2.2.4 se muestran en las tablas 2.4.1 y 2.4.2. La diferencia entre los valores experimentales y los calculados es hasta del 46.08 % para el claro de 0.20 m; Cabe mencionar que aunque se obtuvo un factor de claro para este arreglo no se recomienda su uso como vóltmetro en corriente directa con polaridad positiva debido a la gran dispersión en sus valores experimentales para los claros de 0.20, 0.40 y 0.60 m. Este arreglo presenta (como se vera más adelante) una buena confiabilidad en sus valores de ruptura para separaciones entre el electrodo punta y el plano a partir de 0.80 m.

Tabla 2.4.1 Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.

Claro = 1.00 m				Claro = 0.80 m				Claro = 0.60 m			
h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)
6.80	315.11	324.81	-3.08	6.10	290.15	256.91	11.45	5.40	228.56	190.49	16.66
7.60	322.02	328.99	-2.17	7.00	289.20	260.68	9.86	6.00	232.25	192.37	17.17
7.80	321.23	330.04	-2.74	7.70	286.22	263.61	7.90	6.60	232.00	194.26	16.27
8.60	325.33	334.22	-2.73	8.00	286.00	264.87	7.39	7.80	235.66	198.02	15.97
14.00	342.85	362.48	-5.42	8.30	285.69	266.12	6.85	8.00	230.27	198.65	13.73
--	--	--	--	14.00	295.02	289.98	1.71	8.50	231.20	200.22	13.40
--	--	--	--	--	--	--	--	9.34	236.28	202.86	14.15
--	--	--	--	--	--	--	--	13.80	242.33	216.86	10.51

Tabla 2.4.2 Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.

Claro = 0.40 m				Claro = 0.20 m			
h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)
5.70	180.23	127.62	29.19	5.80	118.53	63.91	46.077
6.40	186.66	129.09	30.845	6.40	110.63	64.54	41.659
8.00	175.25	132.43	24.431	8.00	100.03	66.22	33.803
8.30	174.33	133.06	23.672	8.30	97.65	66.53	31.868
8.70	177.33	133.90	24.492	9.34	108.23	67.62	37.523
13.80	182.25	144.57	20.673	13.50	125.32	71.97	42.569

La figura 2.4.1 muestra los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en comparación con los valores calculados empleando 2.2.4, para distintos claros entre el electrodo punta y el plano, en función de la humedad absoluta.

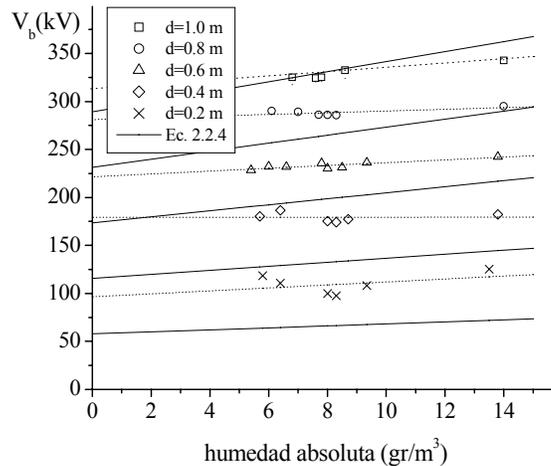


Figura 2.4.1 Tensiones de ruptura promedio experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva en función de la humedad absoluta para claros de 0.20 a 1.00 m.

Al igual que el arreglo punta cuadrada-plano, éste arreglo también presenta un comportamiento similar del campo de propagación en función del claro entre electrodos. Este comportamiento es similar al reportado por Espino [32]. La figura 2.4.2 muestra éste comportamiento y sus valores pueden observarse en la tabla 2.4.3. Se observa a partir de la figura 2.4.2 que el campo eléctrico de propagación tiende a disminuir conforme la separación entre el electrodo punta y el plano aumenta.

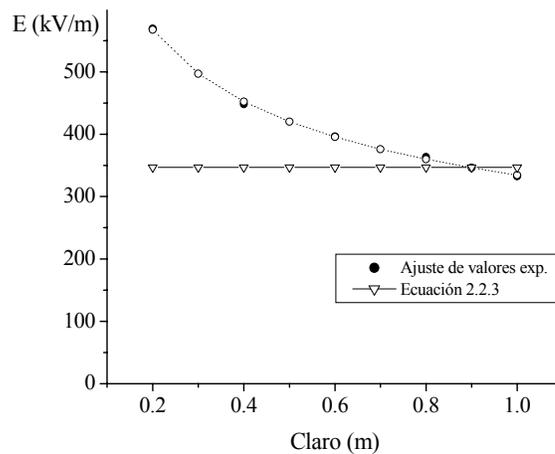


Figura 2.4.2 Campo de eléctrico de propagación calculado para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva en función del claro entre electrodos, para un valor de humedad absoluta de 11.00 gr/m³.

En la tabla 2.4.3 también se muestran los valores del campo eléctrico de propagación de los streamers calculado con la ecuación 2.2.3 y el obtenido con el ajuste de los valores experimentales (V_{b11}/d); así mismo, se reporta el factor de claro por el cual debe multiplicarse el modelo 2.2.3 para obtener el campo de propagación de los streamers para el electrodo de punta semiesférica. En la figura 2.4.3 se observa el comportamiento del factor de claro en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.

De acuerdo al comportamiento mostrado en la figura 2.4.3 se propone el siguiente factor de claro para esta configuración:

$$S=0.965d^{0.33} \quad (2.4.1)$$

Tabla 2.4.3 Factor de claro para la configuración punta semiesférica-plano a condiciones estándar de humedad absoluta.

Claro (m)	E exp. (kV/m)	Ecuación 2.2.3	Factor de claro
0.20	569.19	346.78	1.64
0.40	448.39	346.78	1.29
0.60	396.18	346.78	1.14
0.80	363.62	346.78	1.04
1.00	332.62	346.78	0.96

Por lo tanto, se puede emplear 2.2.3 para calcular el campo eléctrico de propagación de los streamers considerando el factor de claro para este arreglo punta-plano:

$$E = 500[k_1 + k_2]S \quad (2.4.2)$$

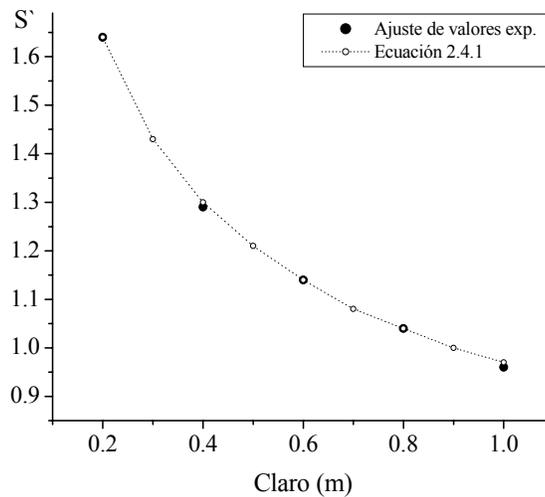


Figura 2.4.3 Factor de claro para obtener el campo de propagación de los streamers para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva a condiciones estándar de humedad absoluta.

La tabla 2.4.4 muestra el campo de propagación calculado en función del claro y aquellos obtenidos empleando la ecuación 2.4.2, en condiciones estándar de humedad absoluta. La diferencia máxima entre ambos es de 0.05%.

Tabla 2.4.4 Campo eléctrico de propagación calculado con la ecuación 2.4.2 y el obtenido mediante el ajuste de los datos experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva.

Claro (m)	Grad. exp.(kV/m)	Ecuación 2.4.2	Dif (%)
0.20	569.19	567.34	0.05
0.40	448.39	451.97	0.02
0.60	396.18	395.68	0.01
0.80	363.62	360.05	-0.01
1.00	332.62	334.64	-0.02

De manera similar, para calcular la tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica-plano, 2.2.4 queda considerando el factor de claro como:

$$V = 500d[k_1 + k_2]S \quad (2.4.3)$$

En las tablas 2.4.5 y 2.4.6 se muestran los valores de ruptura experimentales y los calculados con el modelo anterior, así como su diferencia para distintos puntos de humedad absoluta y claro.

Tabla 2.4.5 Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica-plano con polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.

Claro = 1.00 m				Claro = 0.80 m				Claro = 0.60 m			
h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)
6.80	315.11	313.44	0.53	6.10	290.15	266.75	8.07	5.40	228.56	217.35	4.90
7.60	322.02	317.48	1.41	7.00	289.20	270.66	6.41	6.00	232.25	219.50	5.49
7.80	321.23	318.49	0.85	7.70	286.22	273.70	4.37	6.60	232.00	221.65	4.46
8.60	325.33	322.53	0.86	8.00	286.00	275.01	3.84	7.80	235.66	225.95	4.12
14.00	342.85	349.79	-1.73	8.30	285.69	276.31	3.28	8.00	230.27	226.67	1.57
--	--	--	--	14.00	295.02	301.08	-2.06	8.50	231.20	228.46	1.19
--	--	--	--	--	--	--	--	9.34	236.28	231.47	2.04
--	--	--	--	--	--	--	--	13.80	242.33	247.44	-2.11

Tabla 2.4.6 Valores experimentales de tensión de ruptura para el arreglo punta semiesférica–plano polaridad positiva, a distintos puntos de humedad absoluta.

Claro = 0.40 m				Claro = 0.20 m			
h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)	h (gr/m ³)	V _b (kV)	V _b calc (kV)	Dif (%)
5.70	180.23	166.33	7.71	5.80	118.53	104.57	11.78
2.640	186.66	168.24	9.87	6.40	110.63	105.59	4.55
8.00	175.25	172.60	1.51	8.00	100.03	108.33	-8.30
8.30	174.33	173.42	0.52	8.30	97.65	108.85	-11.47
8.70	177.33	174.51	1.59	9.34	108.23	110.63	-2.21
13.80	182.25	188.43	-3.39	13.50	125.32	117.75	6.04

La figura 2.4.4 muestra las tensiones de ruptura experimentales y calculadas con el modelo 2.4.3 en función de la humedad absoluta y para los claros en estudio. Como puede notarse existen valores calculados que tienen una diferencia con los experimentales mayor al 5%; esto debido a la enorme dispersión que presenta este electrodo punta de los valores de ruptura experimentales.

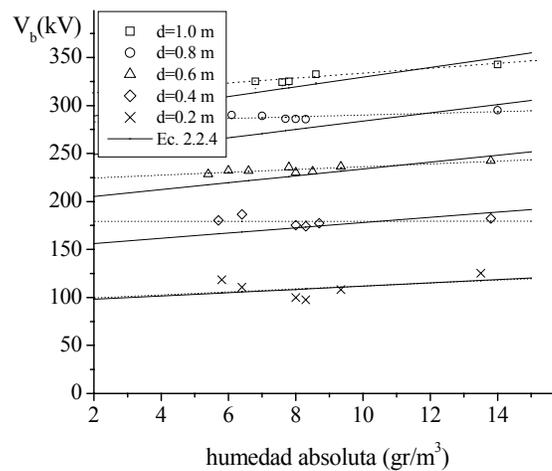


Figura 2.4.4 Tensiones de ruptura promedio experimentales y calculadas con la ecuación 2.4.3 para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad positiva en función de la humedad absoluta para claros de 0.20 a 1.00 m.

A partir de las figuras 2.4.5 y 2.4.6 se observa que este arreglo presenta una desviación estándar mayor al 6% para los claros de 0.20 m, 0.40 m y 0.60 m; mientras que para las separaciones de 0.80 m y 1.00 m ésta es alrededor del 2%, por lo tanto presenta valores de ruptura confiables para separaciones entre el electrodo punta y plano a partir de 0.80 m.

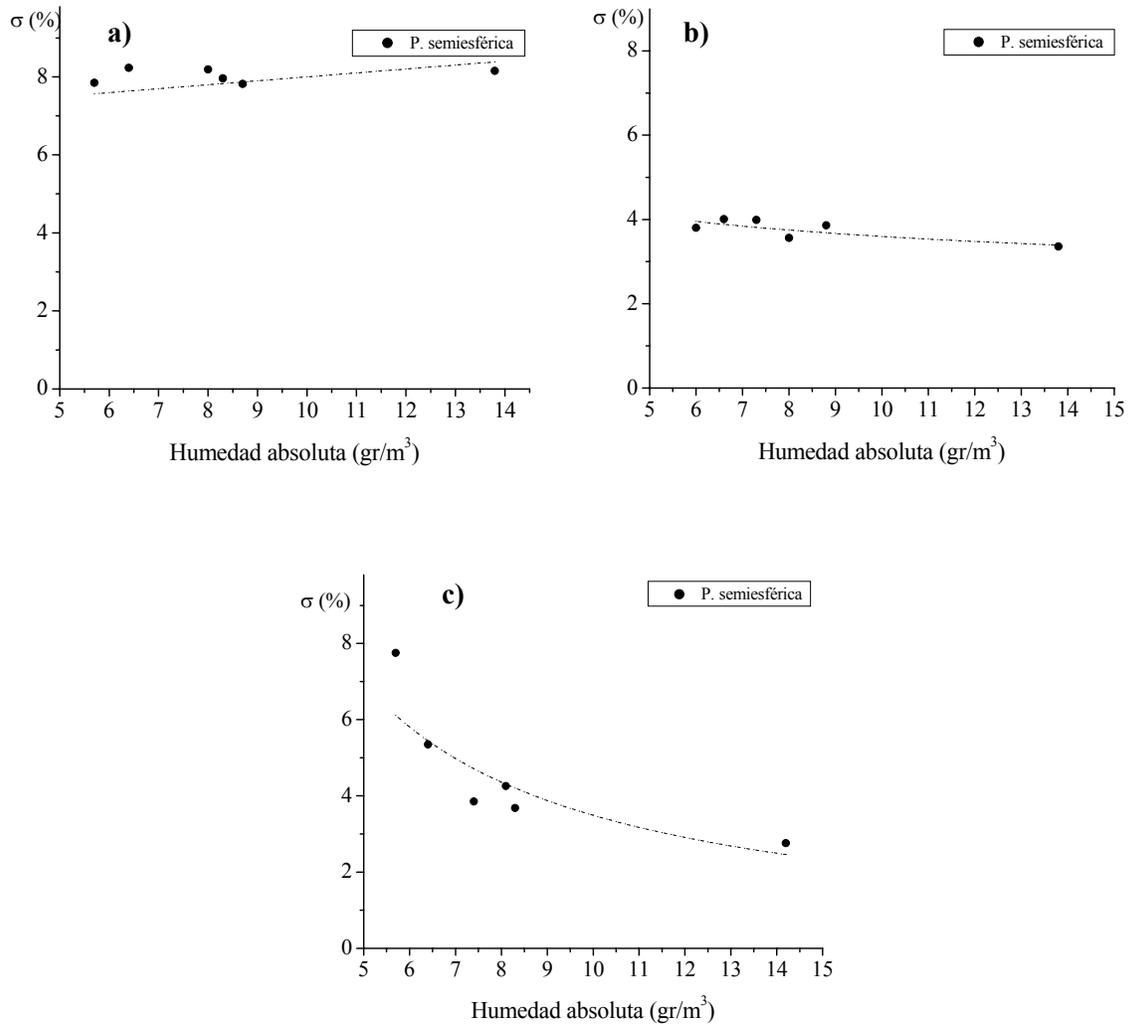


Figura 2.4.5 Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta semiesférica-plano para los claros de a) 0.20y c) 0.60 m.

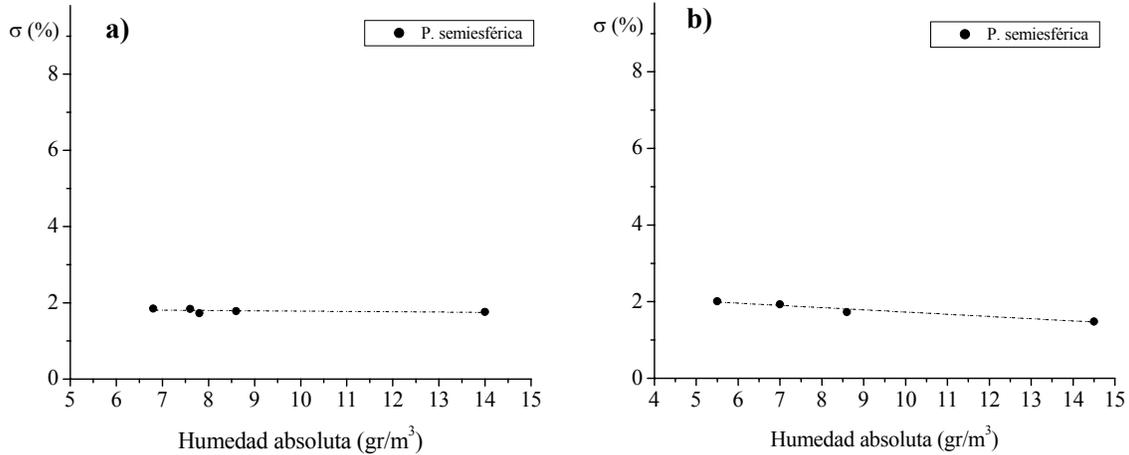


Figura 2.4.6 Desviación estándar en función de la humedad absoluta para el arreglo punta semiesférica-plano para los claros de a) 0.80 m y b) 1.00 m.

2.5 INFLUENCIA DEL PERFIL DE LOS ELECTRODOS

A nivel del mar la tensión de ruptura tiende a ser de la misma magnitud para cualquier electrodo punta empleado a partir de 0.50m [9]; a gran altitud, de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, este fenómeno se observa para separaciones a partir de 0.80 m (figura 2.5); por lo tanto este comportamiento es distinto a gran altitud en comparación a nivel del mar debido a la influencia de la densidad relativa del aire. Por ejemplo para las separaciones de 0.20 m, 0.40 m y 0.60 m la geometría del electrodo punta es un parámetro importante para determinar el valor de la tensión a la cual ocurre la descarga eléctrica. Para separaciones mayores la geometría empleada deja de ser un parámetro importante a considerar, debido a que conforme la separación entre el electrodo punta y el plano es mayor, la terminación del electrodo punta tiende a representar un punto en el espacio. Consecuentemente, la magnitud de la tensión de ruptura tiende a ser del mismo valor

independientemente del electrodo punta que se emplee. Para la separación de 0.80 m la magnitud de la tensión de ruptura a un valor de humedad absoluta de 11 gr/m^3 es de 277.52 kV, 289.8 kV y 290.11 kV para los electrodos de punta cónica, punta cuadrada y punta semiesférica, respectivamente. La diferencia de la tensión de ruptura entre los electrodos punta difiere alrededor del 4%; Al nivel del mar se considera que esta diferencia es a partir del claro de 0.50 m; Para separaciones mayores la diferencia entre las magnitudes de las tensiones de ruptura es menor. Con el claro de 1.00 m, ésta es alrededor del 2%.

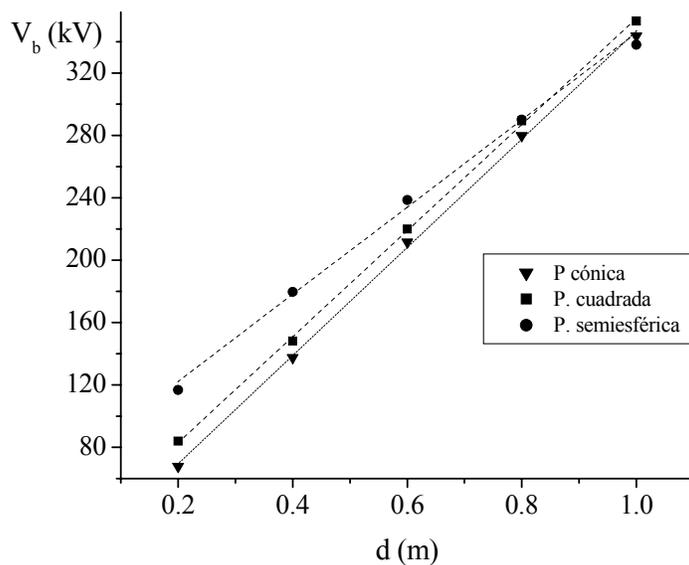


Figura 2.5 Tensión de ruptura para los tres electrodos punta empleados durante las pruebas de laboratorio en corriente directa con polaridad positiva en función del claro entre el electrodo punta y el plano.

2.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los valores de tensión de ruptura reportados en el presente trabajo son menores que aquellos reportados a nivel del mar. Esto se debe a que el gas está compuesto de moléculas, y a que la trayectoria libre promedio (λ) depende de la presión en forma inversa. Entonces, a mayor presión existirá menor trayectoria libre promedio; por lo tanto a mayor altitud habrá menor presión y la trayectoria libre media aumenta. Esto permite que la probabilidad de ionización sea mayor ya que las moléculas pueden adquirir suficiente energía para ionizar las partículas del gas ocasionando que la tensión de ruptura sea menor conforme aumenta la altitud [7].

La tensión de ruptura para los tres electrodos punta empleados en corriente directa con polaridad positiva tiende a incrementarse conforme la humedad absoluta aumenta; esto se debe a que al incrementar la humedad absoluta el medio aislante tiende a ser más electronegativo ocasionando que el coeficiente de captura (η) sea mayor por lo que el coeficiente efectivo de ionización disminuye ($\bar{\alpha}$). Por lo tanto, es necesario incrementar la tensión aplicada para que el coeficiente de ionización aumente y con esto el coeficiente efectivo de ionización y la ruptura se lleve a cabo. El incremento de la humedad absoluta provoca además de un incremento en la tensión de ruptura un aumento en la tensión de inyección y de la tensión a la cual se establece el resplandor; mientras los streamers de pre-ruptura se presentan a menor tensión al aumentar la humedad absoluta, su frecuencia se reduce con lo cual su amplitud es menor haciéndose necesario incrementar la tensión aplicada para dar lugar a la ruptura eléctrica [32].

La tensión de ruptura para separaciones a partir de 0.8 m para los electrodos de punta cónica y punta cuadrada es de 277.52 y 289.8 kV, respectivamente. Para la

punta semiesférica ésta es de 290.11 kV; La diferencia de esas tensiones de ruptura es alrededor del 4 %. éste fenómeno se considera que sucede a nivel del mar para separaciones a partir de 0.50 m. Para separaciones mayores la diferencia citada tiende a disminuir. Por lo tanto la geometría del electrodo juega un papel importante para determinar la tensión de ruptura para claros menores a 0.50 m a nivel del mar. A gran altitud la geometría del electrodo para claros menores a 0.80 m.

2.7 CONCLUSIONES

Los arreglos punta cónica-plano y punta cuadrada-plano presentan una menor dispersión de los valores de ruptura en comparación al arreglo punta cuadrada-punta cuadrada propuesto en la Norma Internacional IEC-60 como herramienta para la medición de altas tensiones con cd; Además, como es sabido, los arreglos punta-plano ofrecen un intervalo mayor de linealidad de la tensión de ruptura contra la humedad específica, lo que representa la principal ventaja de los primeros, ya que esos valores de humedad son mayores en varias partes del mundo así como en la República Mexicana [36].

El arreglo punta cónica-plano es una buena alternativa como vóltmetro de altas tensiones de corriente directa con polaridad positiva al igual que el arreglo punta cuadrada-plano a grandes altitudes sobre el nivel del mar debido a la dispersión que presentan sus valores de ruptura ($< 2\%$); sin embargo, los resultados reportados a nivel del mar muestran que el electrodo punta cuadrada presenta un mayor intervalo de linealidad en sus valores de tensión de ruptura contra la humedad absoluta [8]. Para el arreglo punta cuadrada-plano, esa linealidad se pierde para valores de 29

gr/m³, mientras que para el arreglo punta cónica-plano su límite es de 23 gr/m³. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos en el presente capítulo, se recomienda el arreglo punta cuadrada-plano para emplearse como voltmetro de cd, con polaridad positiva, a bajas y grandes altitudes sobre el nivel del mar; con esto se finaliza la discusión sobre la mejor alternativa para emplearse como voltmetro de cd con polaridad positiva. Para efectos de corrección de tensiones de corriente directa con polaridad positiva se observa que empleando el modelo descrito en la referencia [2] y con los factores de claro propuestos en el presente capítulo, dicho modelo es una herramienta válida para corregir tensiones de cd a cualquier altitud para claros de 0.20 m hasta 1.00 m en el intervalo de humedad absoluta de 8 gr/m³ a 14.2 gr/m³. El error máximo entre los valores de tensión calculados y experimentales considerando los factores de claro es de 4.4 % y 4.8 % para los electrodos de punta cónica y punta cuadrada, respectivamente. El factor de claro para la punta cónica es igual a 1.0, para el electrodo de punta cuadrada $1.01d^{-0.10}$ mientras que para el arreglo punta semiesférica-plano este es $0.96d^{-0.33}$. El modelo en [2] puede emplearse para cualquier electrodo punta considerando el factor de claro correspondiente. La Norma Internacional IEC-60 considera intrínsecamente los factores de claro así como cualquier configuración a través del parámetro adimensional g, sin embargo los errores obtenidos entre los valores calculados y experimentales, a gran altitud, sobrepasan el error permitido (<5 %).

El arreglo punta semiesférica-plano muestra, de acuerdo a su desviación estándar de sus valores de ruptura (< 2 %) ser una herramienta confiable para medir tensiones de cd con polaridad positiva para separaciones de 0.80 m y 1.0 m en el intervalo de humedad absoluta analizado; sin embargo, su gran dispersión para claros menores (> 2 %) lo descartan como la herramienta más fiable para emplearse como voltmetro de altas tensiones de corriente directa con polaridad positiva. La desviación estándar promedio de la tensión de ruptura es de 8 %, 3.5 % y 4 % para los claros de 0.20 m, 0.40 m y 0.60 m.

El promedio de la magnitud de la tensión de ruptura considerando humedad absoluta estándar tiende a ser del mismo valor promedio para los tres electrodos punta presentados para la distancia interelectrónica a partir de 0.80 m. A nivel del mar, la tensión de ruptura tiende a ser de la misma magnitud para separaciones a partir de 0.50 m. Por lo tanto este fenómeno se presenta a claros distintos a gran altitud sobre el nivel del mar debido a la influencia de la densidad relativa del aire sobre la tensión de ruptura.

El coeficiente de humedad absoluta, a gran altitud, varía con la separación entre electrodos. Cuando el mecanismo que gobernó durante la descarga fue por streamers positivos se obtuvo un coeficiente promedio de humedad absoluta de $1.1 \text{ \%}/\text{gr}/\text{m}^3$, el cual concuerda con lo reportado en [8, 9 y 21]. Cuando otro mecanismo coexistió o gobernó durante la ruptura, este coeficiente aumento, contrario a lo que considera la Norma IEC-60 en su procedimiento de corrección para tensiones de corriente directa, donde menciona que si coexiste o gobierna otro mecanismo durante la ruptura, entonces los factores de corrección deberán de ser menores.

Capítulo 3

TENSIONES DE RUPTURA EN POLARIDAD NEGATIVA

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se analizan las tensiones de ruptura obtenidas experimentalmente a una altitud de 2240 msnm ($\delta=0.77$) en corriente directa con polaridad negativa, para los arreglos punta cónica-plano, punta cuadrada-plano y punta semiesférica-plano. Los valores de ruptura se analizan en función de la humedad absoluta, del perfil del electrodo punta y de la separación entre el electrodo punta y el plano. Se muestra que, aunque la tensión de ruptura para los tres electrodos punta disminuye con la humedad absoluta, esta disminución no es significativa por lo que la corrección por humedad absoluta al igual que a nivel del mar no se considera; Por otro lado, la corrección por densidad relativa del aire, al igual que la Norma IEC-60, si se considera necesaria.

A partir del modelo para el arreglo punta cónica-plano [2] se modifica el factor de corrección por densidad relativa del aire y se introducen factores de claro (S), proponiendo en consecuencia la expresión:

$$V_b = E_{s0}d[k_1+k_2]S$$

Donde V_b es la tensión de ruptura, en kV a cualquier condición atmosférica y separación entre el electrodo punta y el plano; E_{s0} es el campo eléctrico de propagación de los streamers negativos, kV/m , a condiciones atmosféricas estándar, d es la distancia interelectródica en m y S es un factor de claro que depende del electrodo punta empleado; k_1 es la corrección por densidad relativa del aire mientras que k_2 es la corrección por humedad absoluta, la cual no se considera necesaria por lo que el modelo se reduce a la forma:

$$V_b = E_{s0}dk_1S$$

Como puede observarse la corrección implica considerar el efecto de la densidad relativa del aire y del factor de claro. Se demuestra que el campo de propagación de los streamers varía con la distancia interelectródica. Al igual que en el capítulo anterior se realiza un análisis con la finalidad de determinar la influencia de la altitud sobre el electrodo punta y la influencia de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura.

Finalmente se analizan los valores de tensión de ruptura obtenidos experimentalmente para los tres perfiles de electrodos. En base a la desviación estándar de los valores experimentales para cada perfil de electrodo, se propone el electrodo punta más adecuado para ser empleado como voltmetro de corriente directa con polaridad negativa.

3.2 PUNTA CÓNICA-PLANO.

Mediante un ajuste de valores experimentales reportados a nivel del mar [9], se obtuvo la siguiente expresión para calcular el campo de propagación de los streamers para el arreglo punta cónica-plano con polaridad negativa y con un valor de humedad absoluta igual a 11.00 gr/m³:

$$E_{s0}=1476.4-1121.91d \quad (3.2.1)$$

Para una altitud de 2240 msnm se obtuvieron en laboratorio las tensiones de ruptura con polaridad negativa para éste arreglo. Para cada claro se obtuvo un ajuste de las tensiones de ruptura contra humedad absoluta; posteriormente, empleando estos ajustes, se calcularon los valores de ruptura a un valor de $h=11.00\text{gr/m}^3$ (V_{b11}). Finalmente, se obtuvieron los valores del campo eléctrico de propagación a condiciones estándar de humedad absoluta ($E_{s11}=V_{b11}/d$) que se muestran en la tabla 3.2.1. La gráfica 3.2.1 representa el comportamiento del campo en función de la separación entre el electrodo punta y el plano. Puede observarse de manera similar a cuando se aplica tensión positiva, que el campo de propagación de los streamers disminuye conforme la distancia interelectródica es mayor, lo cual coincide con [3].

Tabla 3.2.1 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el electrodo de punta cónica en función del claro entre el electrodo punta y el plano a condiciones estándar de humedad absoluta.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)	Claro (m)	E_{s11} (kV/m)
0.09	1245.02	0.24	1053.89
0.12	1155.46	0.27	1019.23
0.15	1171.93	0.30	1005.06
0.18	1141.03	0.33	984.48
0.21	1144.95	0.36	972.26

Aplicando el procedimiento de corrección de [2] al ajuste dado en 3.2.1, se observa en la tabla 3.2.2 que los valores calculados están próximos a los valores experimentales. La diferencia máxima que existe es de 3.55%. La expresión para calcular el campo de propagación queda definida como:

$$E_s = E_{s0}k_1 \quad (3.2.2)$$

Siendo $k_1 = \delta^{0.446}$

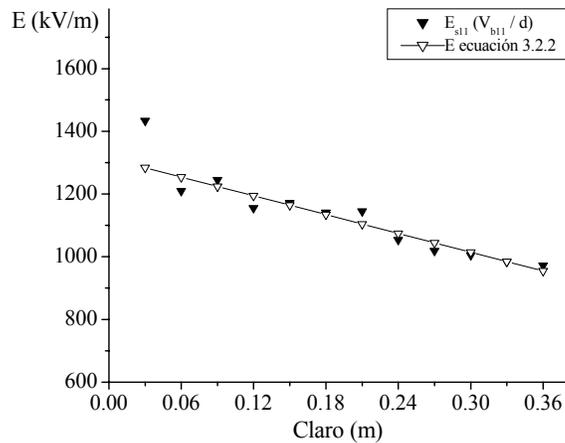


Figura 3.2.1 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cónica-plano en función del claro.

Aunque se hicieron pruebas para separaciones de 0.03 y 0.06 m éstas no se reportan ya que se observó visualmente que la ruptura fue por chispa. A nivel de mar se ha observado que la ruptura en arreglos punta-plano con polaridad negativa es por streamers para claros a partir de 0.01 m; en las pruebas llevadas a cabo en este trabajo se notó que la descarga por streamers comienza a partir de la separación interelectródica de 0.09 m. Por lo tanto, se puede establecer que hay un corrimiento hacia claros mayores de la descarga por streamers provocado por la altitud. En la gráfica de la figura 3.2.1 se muestra el comportamiento del campo eléctrico de propagación de los streamers negativos calculado con 3.2.2 y los obtenidos del ajuste de los valores experimentales a 2240 msnm.

Tabla 3.2.2 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos a 2240 msnm para el electrodo de punta cónica obtenidos con la relación V_{b11}/d y calculados con el modelo 3.2.2.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)	Ec. 3.2.2 (kV/m)	Dif (%)
0.09	1245.02	1224.14	1.68
0.12	1155.46	1194.18	-3.35
0.15	1171.93	1164.23	0.66
0.18	1141.03	1134.27	0.59
0.21	1144.95	1104.32	3.55
0.24	1053.89	1074.36	-1.94
0.27	1019.23	1044.41	-2.47
0.30	1005.06	1014.45	-0.93
0.33	984.48	984.50	-0.01
0.36	972.26	954.54	1.82

Los valores de tensión de ruptura con polaridad negativa que se obtuvieron en las pruebas de laboratorio para el arreglo punta cónica–plano se muestran en la tabla 3.2.3. A partir de la tabla citada se observa que la tensión de ruptura tiende a decrecer conforme aumenta la humedad absoluta. Este fenómeno es cada vez menos acentuado (como se verá más adelante) conforme la separación entre el electrodo punta y el plano se incrementa (tabla 3.2.4). Para obtener la tensión de ruptura con $h=11.00 \text{ gr/m}^3$ se emplea la expresión 3.2.2 escrita de la forma:

$$V_b = E_{s0} k_1 d \quad (3.2.3)$$

La figura 3.2.3 muestra el comportamiento del ajuste de la tensión de ruptura experimental así como la tensión de ruptura calculada con 3.2.3 a un valor de humedad absoluta de 11.00 gr/m^3 . Puede observarse (tablas 3.2.5 y 3.2.6) que la 3.2.3 ajusta a los valores de tensión de ruptura experimentales ya que la diferencia máxima entre estos y la ecuación 3.2.2 es del 3.64%. Se considera que el modelo 3.2.3 es válido para claros a partir de 0.09 m debido a que a partir de este claro la ruptura es por streamers.

Tabla 3.2.3 Valores de tensión de ruptura experimentales y calculados empleando el modelo 3.2.3 para el arreglo punta cónica-plano en corriente directa con polaridad negativa, para separaciones entre electrodos de 0.03 m a 0.36 m

Claro= 0.03 m		Claro= 0.06 m		Claro= 0.09 m	
$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$
8.04	46.53	8.04	72.99	8.6	113.30
9.96	43.71	9.80	71.54	9.68	115.80
12.40	40.81	12.40	73.65	12.4	111.65
13.40	41.25	13.40	72.29	13.4	107.35
Claro= 0.12 m		Claro= 0.15 m		Claro= 0.18 m	
$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$
8.84	138.70	8.68	176.50	7.76	207.30
9.89	138.60	9.56	175.90	8.68	204.20
12.90	139.65	12.90	175.80	13.16	204.95
13.65	137.60	14.05	174.65	14.05	205.15
Claro= 0.21 m		Claro= 0.24 m		Claro= 0.27 m	
$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$
7.81	243.70	8.00	255.20	6.50	280.30
8.00	242.20	8.84	254.50	7.87	278.60
9.04	241.50	13.50	253.05	9.21	276.30
13.95	238.30	13.84	248.85	13.40	272.95
Claro= 0.30 m		Claro= 0.33 m		Claro= 0.36 m	
$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$	$h(\text{gr/m}^3)$	$V_b \text{ exp (kV)}$
7.38	305.20	7.38	328.92	7.38	356.62
8.32	304.40	8.55	327.60	8.61	352.40
9.38	301.40	9.38	324.60	9.51	348.33
13.30	299.95	13.80	322.80	13.80	348.02

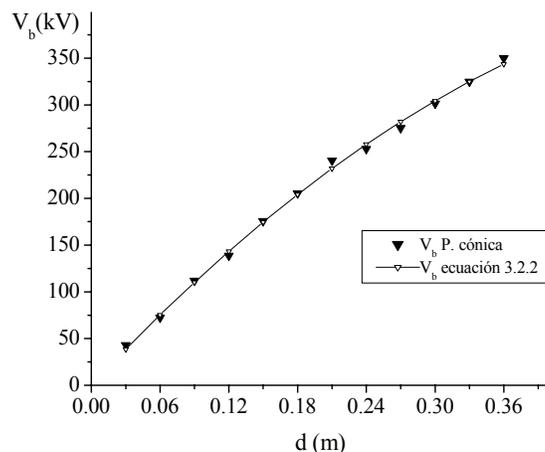


Figura 3.2.2 Tensión de ruptura a 11 gr/m^3 , para el arreglo punta cónica–plano en función del claro.

Para cuantificar el efecto de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura se empleará el coeficiente de humedad definido anteriormente en el capítulo 2 (ecuación 2.3.4). Los coeficientes obtenidos para éste electrodo punta se muestran en la tabla 3.2.4.

Tabla 3.2.4 Coeficiente de humedad absoluta para el electrodo de punta cónica en función del claro.

d (m)	$K_h \text{ exp}(\%/gr/m^3)$	d (m)	$K_h \text{ exp}(\%/gr/m^3)$
0.03	-2.59	0.21	-0.32
0.06	0.05	0.24	-0.31
0.09	-1.19	0.27	-0.32
0.12	-0.04	0.30	-0.29
0.15	-0.15	0.33	-0.28
0.18	-0.08	0.36	-0.32

Allen et al.[8, 9] reportan que en el intervalo de humedad absoluta de 9 gr/m^3 a 40 gr/m^3 la tensión de ruptura en polaridad positiva permanece constante. Por lo tanto, no consideran necesaria la corrección por humedad absoluta.

Como puede observarse de la tabla 3.2.4 el efecto de la humedad sobre la tensión de ruptura tiende a ser menor al aumentar el claro; es de esperarse que este coeficiente continúe disminuyendo. Para claros menores la influencia de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura es más severa, esta es de $-2.59\%/gr/m^3$ para $d = 0.03$ m, ya que la ruptura es por chispa; para $d = 0.09$ el coeficiente de humedad es de $-1.19\%/gr/m^3$ debido a la transición en el modo de descarga de chispa a streamer (esto se ve reflejado en la desviación estándar de los valores de ruptura los cuales son mayores cuando la ruptura es por chispa). La figura 3.2.3 muestra la variación de dicho coeficiente de humedad en función de la separación de la geometría empleada.

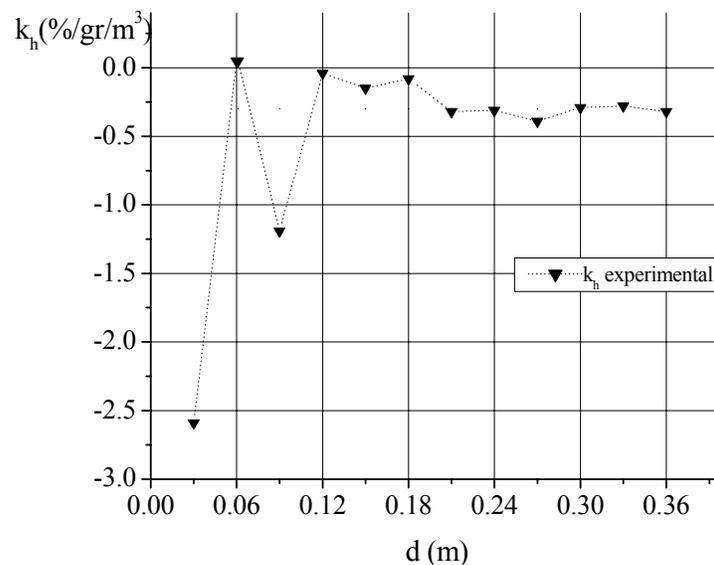


Figura 3.2.3 Coeficiente de humedad para el arreglo punta cónica-plano, en corriente directa en polaridad negativa, en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.

Abraham y Prabhakar [17, 18] reportan que el coeficiente de humedad absoluta está en función de la separación entre el electrodo punta y el plano; reportaron que este coeficiente tiene el mismo comportamiento a distintos valores de temperatura en un

intervalo que vario de 25 °C a 37 °C, en ambas polaridades con tensiones de corriente directa. Allen et al [9], de manera análoga proponen un factor de corrección por temperatura por lo que sugiere que el procedimiento empleado por la norma internacional IEC-60 [1] para corregir tensiones por densidad relativa del aire es inválido cuando se cambia la temperatura. En este trabajo no se propone algún factor de corrección por temperatura; aunque en un principio se llevo a cabo un análisis de la tensión de ruptura contra la temperatura, éste no mostró ningún patrón general conforme la temperatura era mayor debido a que el intervalo en que se realizaron las pruebas fue muy corto (17 a 23°C). De acuerdo a la figura 3.2.3 la corrección por humedad absoluta (k_2) no es necesaria debido que la influencia de ésta sobre la tensión de ruptura de acuerdo a lo publicado a nivel del mar tiende a disminuir. Por lo tanto, se considera que únicamente se requiere la corrección por densidad relativa del aire (k_1).

Las tablas 3.2.5 y 3.2.6 muestran las tensiones de ruptura experimentales y las calculadas empleando la expresión 3.2.3; se observa que el modelo ajusta satisfactoriamente a los valores de tensión experimentales para separaciones a partir de a 0.09 m. El error máximo entre los valores experimentales y los calculados es del 4.49%.

Las figuras 3.2.4 y 3.2.5 muestran el comportamiento de la tensión de ruptura en función de la humedad absoluta y de los claros en estudio. Aunque se observa que la tensión de ruptura disminuye al aumentar la humedad, las pendientes mostradas no son muy pronunciadas, caso contrario al efecto que se presenta cuando se emplean tensiones con polaridad positiva.

Tabla 3.2.5 Valores de tensión de ruptura experimentales y calculados empleando el modelo 3.2.3 para el arreglo punta cónica-plano con corriente directa en polaridad negativa, para separaciones entre electrodos de 0.03m a 0.24m

Claro = 0.03 m				Claro = 0.06 m			
h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)	h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)
8.04	46.53	38.52	17.2	8.04	72.99	75.24	-3.09
9.96	43.71	38.52	11.9	9.80	71.54	75.24	-5.18
12.40	40.81	38.52	5.61	12.40	73.65	75.24	-2.16
13.40	41.25	38.52	6.62	13.40	72.29	75.24	-4.08
Claro = 0.09 m				Claro = 0.12 m			
h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)	h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)
8.6	113.30	110.17	2.76	8.84	138.70	143.29	-3.31
9.68	115.80	110.17	4.86	9.89	138.60	143.29	-3.39
12.4	111.65	110.17	1.33	12.90	139.65	143.29	-2.61
13.4	107.35	110.17	-2.63	13.65	137.60	143.29	-4.14
Claro = 0.15 m				Claro = 0.18 m			
h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)	h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)
8.68	176.50	174.63	1.06	7.76	207.30	204.16	1.51
9.56	175.90	174.63	0.72	8.68	204.20	204.16	0.02
12.90	175.80	174.63	0.67	13.16	204.95	204.16	0.39
14.05	174.65	174.63	0.01	14.05	205.15	204.16	0.48
Claro = 0.21 m				Claro = 0.24 m			
h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)	h(gr/m³)	V_b exp	V_b calc	Dif(%)
7.81	243.70	231.89	4.84	8.00	255.20	257.84	-1.03
8.00	242.20	231.89	4.25	8.84	254.50	257.84	-1.31
9.04	241.50	231.89	3.97	13.50	253.05	257.84	-1.89
13.95	238.30	231.89	2.68	13.84	248.85	257.84	-3.61

Tabla 3.2.6 Valores de tensión de ruptura experimentales y calculados empleando el modelo 3.2.3 para el arreglo punta cónica-plano en corriente directa con polaridad negativa para separaciones entre electrodos de 0.27m a 0.36m.

Claro = 0.27 m				Claro = 0.30 m			
h(gr/m ³)	V _b exp	V _b calc	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp	V _b calc	Dif(%)
6.50	280.30	281.98	-0.60	7.38	305.20	304.32	0.28
7.87	278.60	281.98	-1.21	8.32	304.40	304.32	0.02
9.21	276.30	281.98	-2.06	9.38	301.40	304.32	-0.97
13.40	272.95	281.98	-3.31	13.30	299.95	304.32	-1.46
Claro = 0.33 m				Claro = 0.36 m			
h(gr/m ³)	V _b exp	V _b calc	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp	V _b calc	Dif(%)
7.38	328.92	324.87	1.23	7.38	356.62	343.62	3.65
8.55	327.60	324.87	0.83	8.61	352.40	343.62	2.49
9.38	324.60	324.87	-0.08	9.51	348.33	343.62	1.35
13.80	322.80	324.87	-0.64	13.80	348.02	343.62	1.26

De las tablas 3.2.5 y 3.2.6 se observa que el error entre los valores calculados y los experimentales es hasta del 17.2%, esto debido a que únicamente se considera que el modelo aplica cuando la descarga es por streamers. Para las separaciones de 0.03 m y 0.06 m la descarga es por chispa.

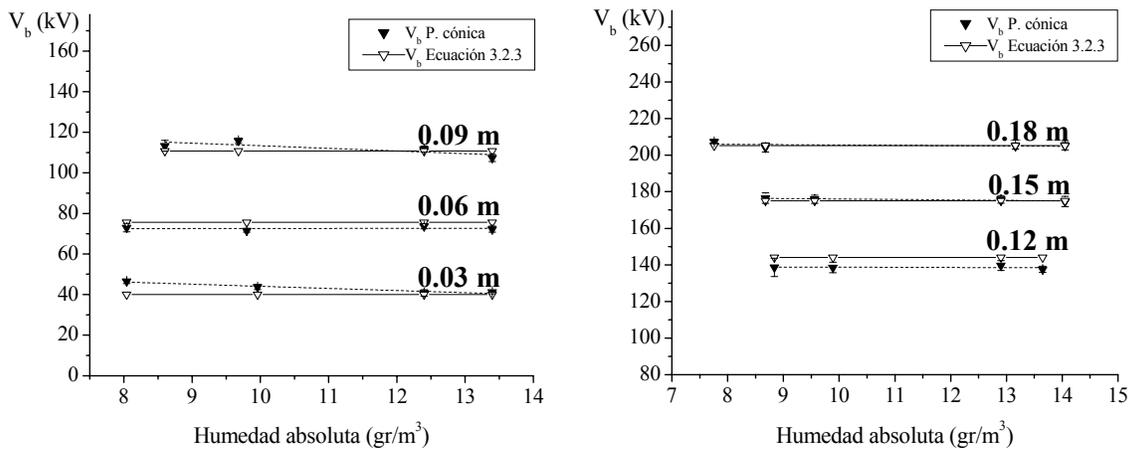


Figura 3.2.4. Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.2.3, para el arreglo punta cónica-plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros.

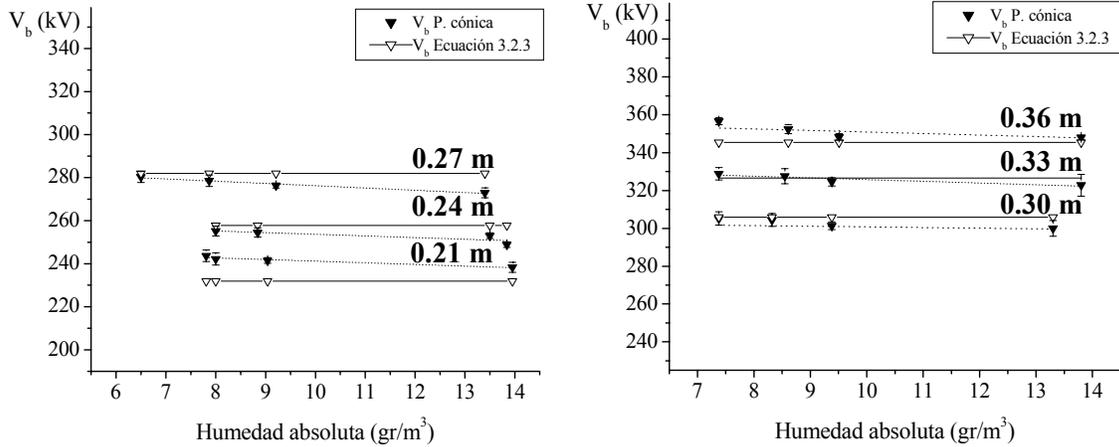


Figura 3.2.5. Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.2.3, para el arreglo punta cónica–plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros.

Las figuras 3.2.6-3.2.8 muestran que para los claros de 0.03 y 0.06 la desviación estándar presenta valores hasta del 3.5%, al igual que para la separación de 0.12 m. Para los demás claros se observa que la desviación es menor al 2%. Por lo tanto presenta resultados confiables para claros a partir de 0.15 m. La gran dispersión que presenta para las separaciones de 0.03 y 0.06 m se debe a que el mecanismo de ruptura es por chispa. Para separaciones mayores la ruptura es por streamers lo cual se ve reflejado en la desviación estándar que disminuye. La dispersión para el claro de 0.12 m se debe a la transición del modo de descarga.

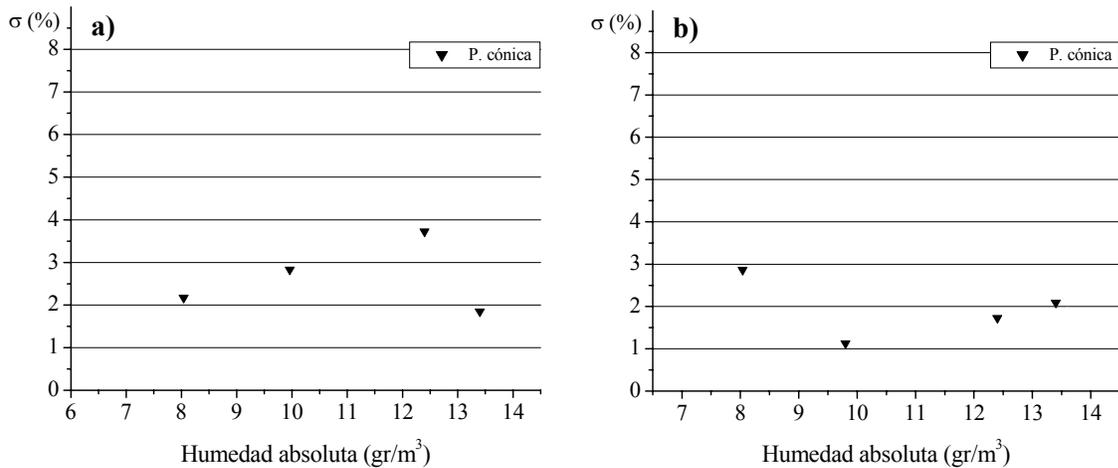


Figura 3.2.6 Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cónica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.03 m y b) 0.06 m.

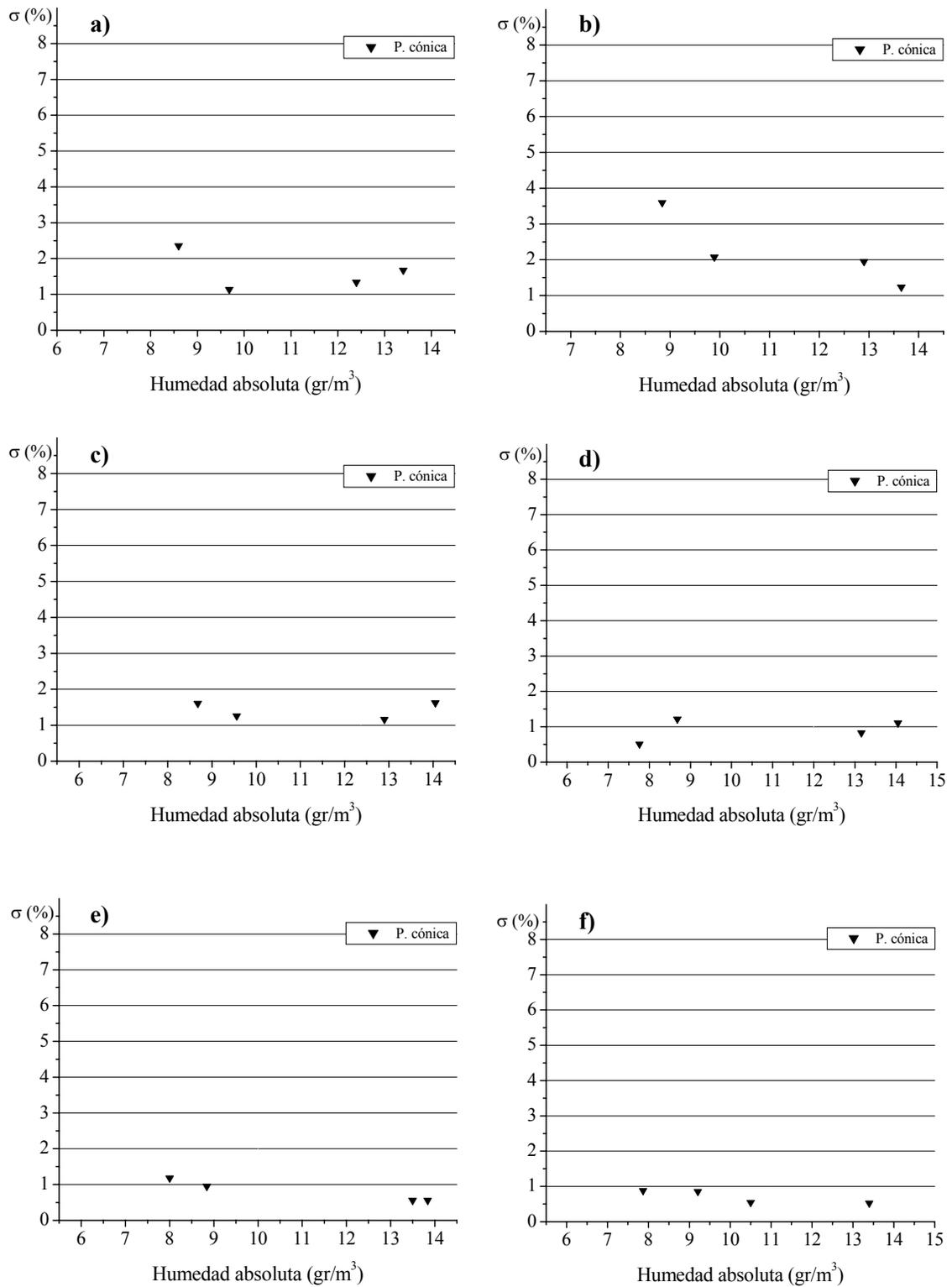


Figura 3.2.7 Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cónica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.09 m, b) 0.12 m, c) 0.15 m, d) 0.18 m, e) 0.21m y f) 0.24 m.

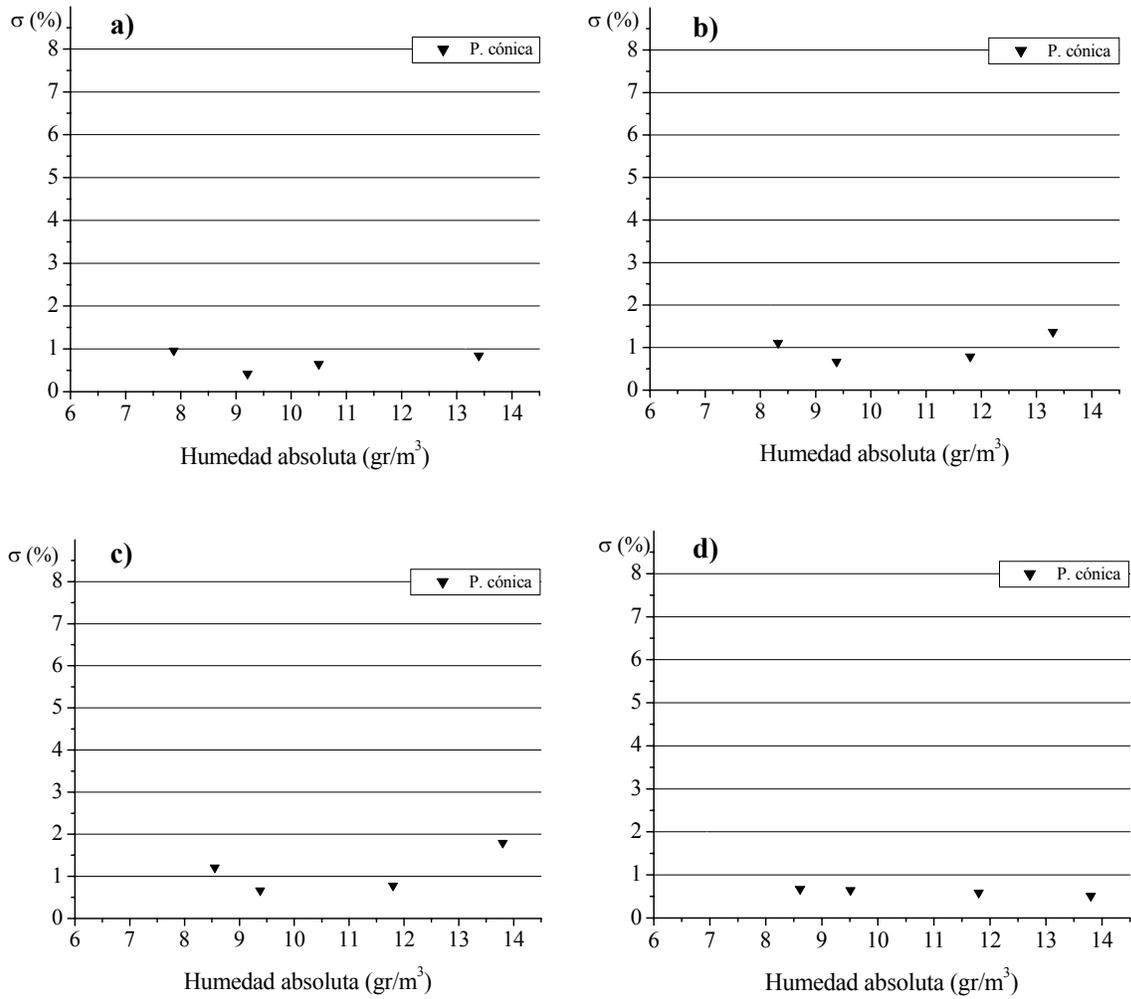


Figura 3.2.8 Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cónica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.27 m, b) 0.30 m, c) 0.33 m y d) 0.36 m.

3.3 PUNTA CUADRADA-PLANO

De los valores de tensión de ruptura obtenidos en laboratorio se obtuvieron, de manera similar al arreglo punta cónica-plano, los valores del campo eléctrico de propagación de los streamers negativos a condiciones estándar de humedad absoluta (V_{b11}/d) que se muestran en la tabla 3.3.1. La gráfica 3.3.1 representa el comportamiento del campo en función de la separación entre el electrodo punta y el plano. Puede observarse de manera similar al electrodo de punta cónica que cuando se aplica tensión negativa, dicho campo disminuye conforme la distancia interelectródica aumenta.

Tabla 3.3.1 Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano en corriente directa con polaridad negativa en función del claro entre el electrodo punta y el plano.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)
0.06	1507.94
0.09	1539.41
0.12	1491.34
0.15	1445.06
0.18	1409.70
0.21	1366.09
0.24	1331.41
0.27	1315.81
0.30	1274.04

Aplicando el procedimiento de corrección dado en (2) al ajuste de la ecuación 3.2.1 se obtiene la tabla 3.3.2. La gráfica 3.3.2 muestra la comparación del campo de propagación para el electrodo de punta cuadrada y aquél obtenido con 3.2.1. Los valores de tensión de ruptura para éste arreglo difieren de los calculados hasta en un 20.63%.

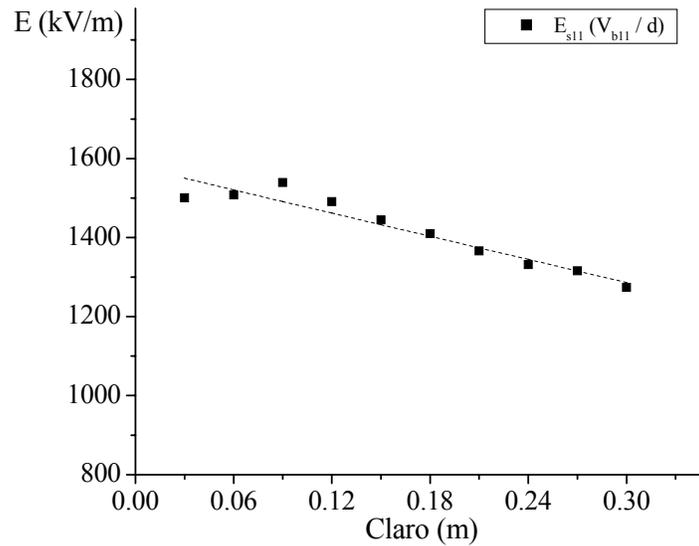


Figura 3.3.1 Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano en función del claro entre electrodos.

La tabla 3.3.2 también muestra el factor por el cual debe de multiplicarse el modelo dado en 3.2.2 para obtener el campo de propagación de los streamers para el electrodo de punta cuadrada. El comportamiento de éste factor se muestra en la figura 3.3.3.

Tabla 3.3.2 Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el electrodo de punta cuadrada obtenidos mediante la relación V_{b11}/d y los calculados con el modelo 3.2.2.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)	Ec. 3.2.2 (kV/m)	Factor de claro	Dif (%)
0.06	1507.94	1254.09	1.20	16.83
0.09	1539.41	1224.14	1.26	20.47
0.12	1491.34	1194.18	1.25	19.93
0.15	1445.06	1164.23	1.24	19.43
0.18	1409.70	1134.27	1.24	19.54
0.21	1366.09	1104.32	1.24	19.16
0.24	1331.41	1074.36	1.24	19.30
0.27	1315.81	1044.41	1.26	20.63
0.30	1274.04	1014.45	1.26	20.34

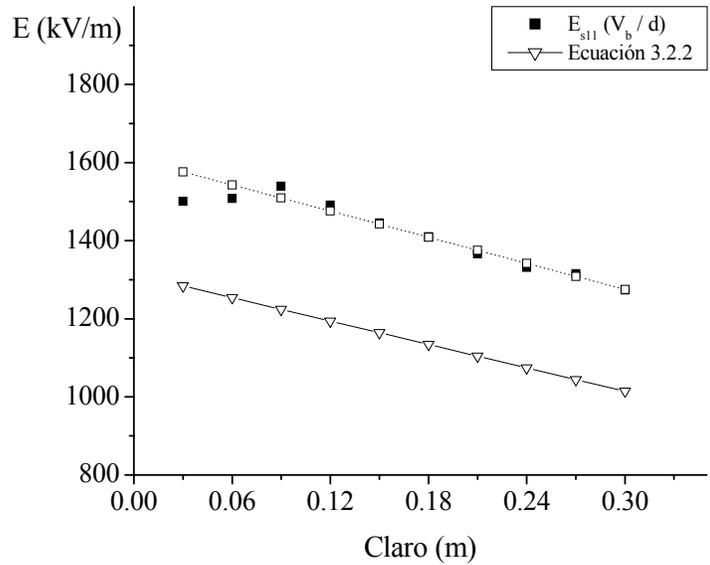


Figura 3.3.2 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano obtenido mediante la relación V_{b11}/d y el calculado con el modelo 3.2.2 en función del claro entre electrodos.

De las figuras 3.3.2 y 3.3.3 se observa que la diferencia entre el campo eléctrico de propagación para el electrodo de punta cuadrada y el electrodo de punta cónica es del mismo valor sin importar el claro; para calcular el campo de propagación para el electrodo de punta cuadrada únicamente es necesario multiplicar el modelo para el arreglo punta cónica-plano por un factor de 1.25.

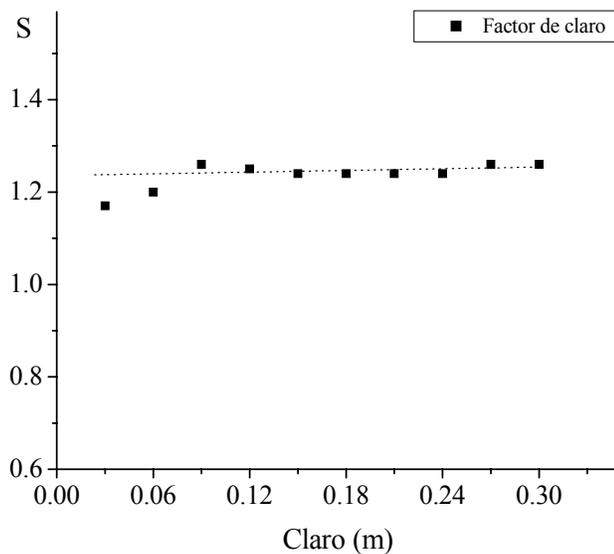


Figura 3.3.3 Factor de claro para el arreglo punta cuadrada-plano con polaridad negativa.

aplicando el factor de claro obtenido a 3.2.2 el campo de propagación de los streamers para éste arreglo se calcula con:

$$E_s = E_{s0} k_1 S \quad (3.3.1)$$

En la tabla 3.3.3 se observa que la diferencia máxima entre el campo de propagación para el arreglo punta cuadrada-plano en comparación con aquellos obtenidos empleando el factor de claro es de 1.05%. La gráfica 3.3.4 muestra que aplicando el factor de claro, los valores tienden a ser más exactos.

Tabla 3.3.3 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta cuadrada-plano obtenido con la relación V_{b11}/d y calculado con la ecuación 3.3.1.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)	E_c 3.3.1 (kV/m)	Dif (%)
0.09	1539.41	1530.17	0.60
0.12	1491.34	1492.72	-0.09
0.15	1445.06	1455.28	-0.71
0.18	1409.70	1417.84	-0.58
0.21	1366.09	1380.40	-1.05
0.24	1331.41	1342.95	-0.87
0.27	1315.81	1305.51	0.78
0.30	1274.04	1268.06	0.47

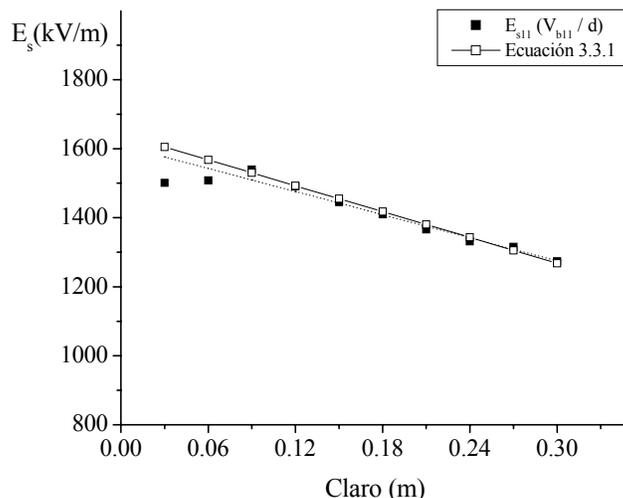


Figura 3.3.4 Campo de eléctrico de propagación de los streamers para el arreglo punta cuadrada-plano obtenido mediante la relación V_{b11}/d y el calculado con el modelo 3.3.1 en función del claro entre electrodos.

Los valores de tensión de ruptura obtenidos en laboratorio en función de la humedad absoluta y del claro entre electrodos para este arreglo se muestran en la tabla 3.3.4.

Tabla 3.3.4 Valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta cuadrada–plano con polaridad negativa, a distintos puntos de humedad absoluta y claro entre electrodos.

Claro = 0.03 m		Claro = 0.06 m		Claro = 0.09 m	
h(gr/m³)	V_b (kV)	h(gr/m³)	V_b (kV)	h(gr/m³)	V_b (kV)
8.81	47.22	8.30	91.04	8.30	141.30
9.70	46.77	9.21	90.66	9.36	142.55
10.82	45.55	10.06	90.44	10.06	135.30
12.00	41.52	11.02	90.08	11.03	138.00
13.69	44.05	12.00	89.40	12.38	139.10
--	--	13.60	91.31	13.60	136.10
Claro = 0.12 m		Claro = 0.15 m		Claro = 0.18 m	
h(gr/m³)	V_b (kV)	h(gr/m³)	V_b (kV)	h(gr/m³)	V_b (kV)
8.66	181.10	8.56	221.40	8.56	256.90
9.38	181.45	9.51	220.45	9.51	254.30
10.35	178.90	10.12	215.60	10.40	255.80
11.03	180.60	11.10	217.10	11.60	253.70
12.38	178.40	12.37	215.70	12.37	253.40
13.60	174.10	13.71	211.40	14.10	247.60
Claro = 0.21 m		Claro = 0.24 m		Claro = 0.27 m	
h(gr/m³)	V_b (kV)	h(gr/m³)	V_b (kV)	h(gr/m³)	V_b (kV)
8.75	291.8	8.80	323.50	7.38	361.30
10.00	287.70	10.00	318.10	8.88	360.60
11.00	284.60	11.00	322.20	12.30	353.50
11.75	286.10	12.42	318.70	13.95	348.60
12.88	286.10	14.00	313.20	--	--
13.90	281.30	--	--	Claro = 0.30 m	
--	--	--	--	h(gr/m³)	V_b (kV)
--	--	--	--	7.38	391.25
--	--	--	--	8.91	386.80
--	--	--	--	12.30	381.25
--	--	--	--	13.63	374.00

La tensión de ruptura para este arreglo se obtiene con 3.2.3 y el factor de claro:

$$V_b = E_{s0}dk_1S \quad (3.3.2)$$

La figura 3.3.5 muestra la tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.3.2, en función del claro entre el electrodo punta y el plano.

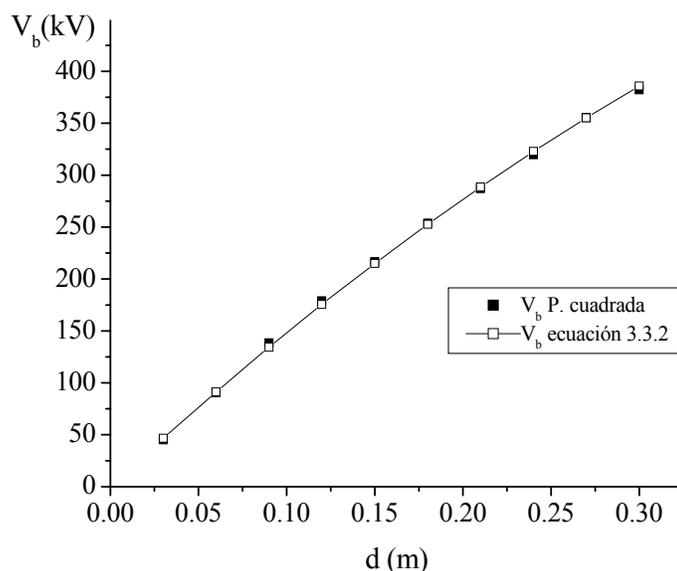


Figura 3.3.5 Tensión de ruptura experimental y calculada para el arreglo punta cuadrada-plano en corriente directa con polaridad negativa en función del claro entre electrodos.

El efecto de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura al igual que para el arreglo punta cónica-plano, como se muestra en la tabla 3.3.5 y figura 3.3.6, depende de la separación entre el electrodo punta y el plano.

Comparando la figura 3.2.2 con la figura 3.3.5, se nota que la tensión de ruptura para el arreglo punta cuadrada-plano es de mayor magnitud a cuando se emplea el electrodo de punta cónica. Este fenómeno se debe a que la tensión de inyección para la descarga corona es de mayor magnitud cuando se emplea el electrodo de punta cuadrada de acuerdo con Isa et al. [34].

Para evaluar la influencia de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura se emplea la ecuación 2.3.4; con esta ecuación se obtienen los valores mostrados en la tabla 3.3.5. La figura 3.3.6 muestra el comportamiento de este coeficiente en función de la separación entre electrodos.

Tabla 3.3.5 Coeficiente de humedad absoluta para el arreglo punta cuadrada–plano con corriente directa y polaridad negativa en función del claro entre el electrodo punta y el plano.

d (m)	k_h (%/gr/m ³)	d (m)	k_h (%/gr/m ³)
0.03	-2.00	0.18	-0.57
0.06	-0.04	0.21	-0.56
0.09	-0.61	0.24	-0.51
0.12	-0.73	0.27	-0.55
0.15	-0.81	0.30	-0.65

Se observa de la figura 3.3.6 que conforme la separación es mayor la influencia de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura tiende a disminuir. De acuerdo a lo publicado por Allen et al [9] es de esperarse que para separaciones mayores el coeficiente continúe disminuyendo, por lo que no es necesaria la corrección por humedad absoluta. Por lo tanto no se considera la corrección por humedad absoluta. Para las separaciones de 0.03 y 0.06 m la ruptura fue por chispa.

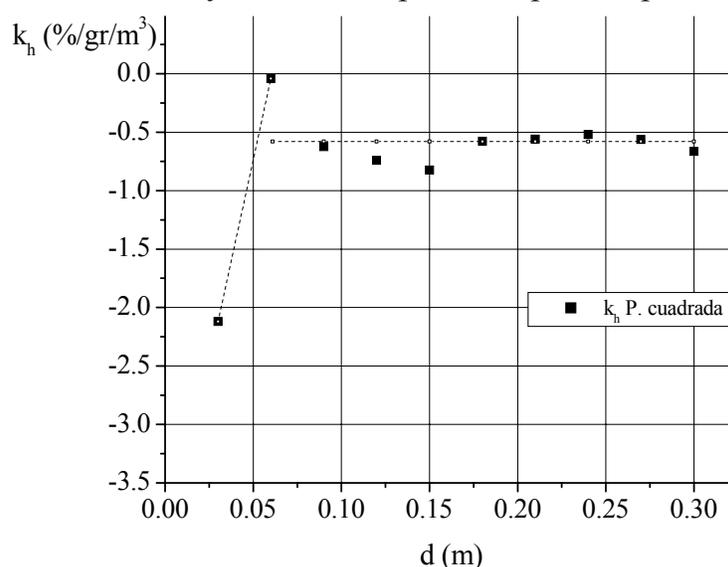


Figura 3.3.6. Coeficiente de humedad para el arreglo punta cuadrada–plano en corriente directa con polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.

Las tablas 3.3.6 y 3.3.7 muestran la diferencia entre los valores de tensión de ruptura y los estimados empleando la expresión 3.3.2. Las figuras 3.3.7 y 3.3.8 muestran el comportamiento de la tensión de ruptura contra la humedad absoluta para cada claro en estudio. Puede observarse que la corrección por humedad no es necesaria

Tabla 3.3.6 Tensiones de ruptura obtenidas experimentalmente y calculadas para el electrodo de punta cuadrada empleando la ecuación 3.3.2 a distintos puntos de humedad absoluta, para claros de 0.03 a 0.18 m.

Claro = 0.03 m				Claro = 0.06 m			
h(gr/m³)	V_bexp(kV)	V_bcalc(kV)	Dif (%)	h(gr/m³)	V_bexp(kV)	V_bcalc(kV)	Dif (%)
8.81	47.22	48.15	-1.97	8.30	91.04	94.05	-3.31
9.70	46.77	48.15	-2.95	9.21	90.66	94.05	-3.74
10.82	45.55	48.15	-5.71	10.06	90.44	94.05	-4.00
12.00	41.52	48.15	-15.97	11.02	90.08	94.05	-4.41
13.69	44.05	48.15	-9.31	12.00	89.40	94.05	-5.20
--	--	--	--	13.60	91.31	94.05	-3.00
Claro = 0.09 m				Claro = 0.12 m			
h(gr/m³)	V_bexp(kV)	V_bcalc(kV)	Dif (%)	h(gr/m³)	V_bexp(kV)	V_bcalc(kV)	Dif (%)
8.30	141.30	137.71	2.54	8.66	181.10	179.12	1.09
9.36	142.55	137.71	3.40	9.38	181.45	179.12	1.28
10.06	135.30	137.71	-1.78	10.35	178.90	179.12	-0.12
11.03	138.00	137.71	0.21	11.03	180.60	179.12	0.82
12.38	139.10	137.71	1.00	12.38	178.40	179.12	-0.40
13.60	136.10	137.71	-1.18	13.60	174.10	179.12	-2.88
Claro = 0.15 m				Claro = 0.18 m			
h(gr/m³)	V_bexp(kV)	V_bcalc(kV)	Dif (%)	h(gr/m³)	V_bexp(kV)	V_bcalc(kV)	Dif (%)
8.56	221.40	218.28	1.41	8.56	256.90	255.20	0.66
9.51	220.45	218.28	0.98	9.51	254.30	255.20	-0.35
10.12	215.60	218.28	-1.24	10.40	255.80	255.20	0.23
11.10	217.10	218.28	-0.55	11.60	253.70	255.20	-0.59
12.37	215.70	218.28	-1.20	12.37	253.40	255.20	-0.71
13.71	211.40	218.28	-3.26	14.10	247.60	255.20	-3.07

Tabla 3.3.7 Tensiones de ruptura obtenidas experimentalmente y calculadas para el electrodo de punta cuadrada empleando la ecuación 3.3.2 a distintos puntos de humedad absoluta, para claros de 0.21 a 0.30m..

Claro = 0.21 m				Claro = 0.24 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif (%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif (%)
8.75	291.80	289.87	0.66	8.80	323.50	322.30	0.37
10.00	287.70	289.87	-0.75	10.00	318.10	322.30	-1.32
11.00	284.60	289.87	-1.85	11.00	322.20	322.30	-0.03
11.75	286.10	289.87	-1.32	12.42	318.70	322.30	-1.13
12.88	286.10	289.87	-1.32	14.00	313.20	322.30	-2.90
13.90	281.30	289.87	-3.05	--	--	--	--
Claro = 0.27 m				Claro = 0.30 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif (%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif (%)
7.38	361.30	352.47	2.44	7.38	391.25	380.404	2.77
8.88	360.60	352.47	2.25	8.91	386.80	380.404	1.654
12.30	353.50	352.47	0.29	12.30	381.25	380.404	0.222
13.95	348.60	352.47	-1.11	13.63	374.00	380.404	-1.71

Puede notarse de las tablas 3.3.6 y 3.3.7 que los valores calculados están acorde a los experimentales; la diferencia máxima es de 3.4%.

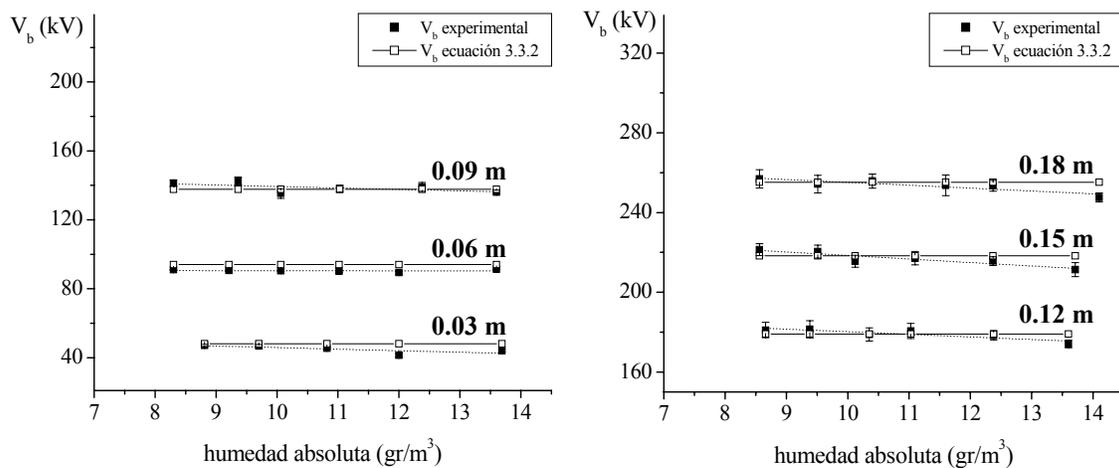


Figura 3.3.7. Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.3.2 para el arreglo punta cuadrada–plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros.

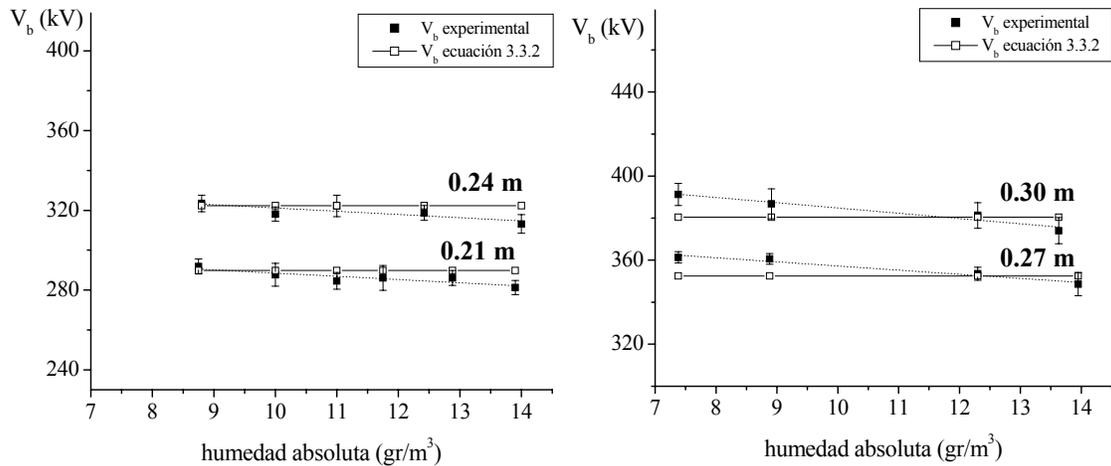


Figura 3.3.8. Tensión de ruptura experimental y calculada con la ecuación 3.3.2 para el arreglo punta cuadrada–plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta a distintos claros.

Al emplear el procedimiento de corrección de la Norma Internacional IEC–60 y tomando como referencia los resultados reportados por Udo y Watanabe[37] y Allen et al.[8], las tensiones de ruptura que se obtendrían a las condiciones bajo estudio difieren de los valores estimados con 3.3.2 hasta un 15%. Los valores estimados son de mayor magnitud que los calculados por medio de la Norma. La tabla 3.3.8 presenta los valores calculados con el modelo 3.3.2 y con la norma en cuestión. Su representación gráfica se muestra en la figura 3.3.9.

Tabla 3.3.8. Valores de tensión de ruptura calculados con la ecuación 3.3.4 y la Norma Internacional IEC-60 a 2240 msnm, para el arreglo punta cuadrada–plano con polaridad negativa.

<i>Claro = 0.20m</i>			Claro = 0.40m		
h(gr/m³)	Ec. 3.3.2 (kV)	V_b IEC(kV)	h(gr/m³)	Ec. 3.3.2 (kV)	V_b IEC(kV)
7.00	278.56	242.55	7.00	457.28	415.80
8.00	278.56	242.55	8.00	457.28	415.80
9.00	278.56	242.55	9.00	457.28	415.80
10.00	278.56	242.55	10.00	457.28	415.80
11.00	278.56	242.55	11.00	457.28	415.80
12.00	278.56	242.55	12.00	457.28	415.80
13.00	278.56	242.55	13.00	457.28	415.80
14.00	278.56	242.55	14.00	457.28	415.80

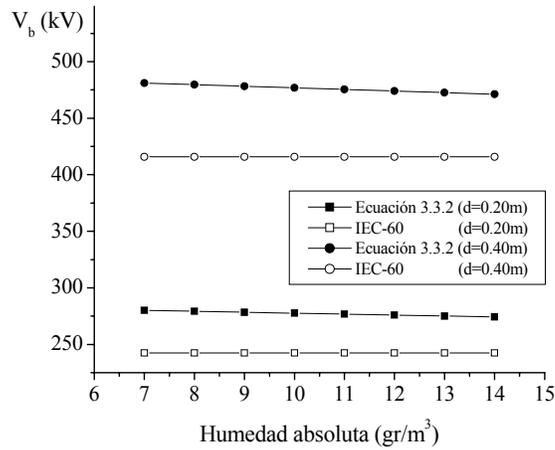


Figura 3.3.9 Tensiones de ruptura calculadas con la ecuación 3.3.2 y la Norma Internacional IEC-60, para el arreglo punta cuadrada-plano con polaridad negativa para los claros de 0.20 y 0.40m.

Las figuras 3.3.10 y 3.3.11 muestran la desviación estándar para los claros en estudio en función de la humedad absoluta.

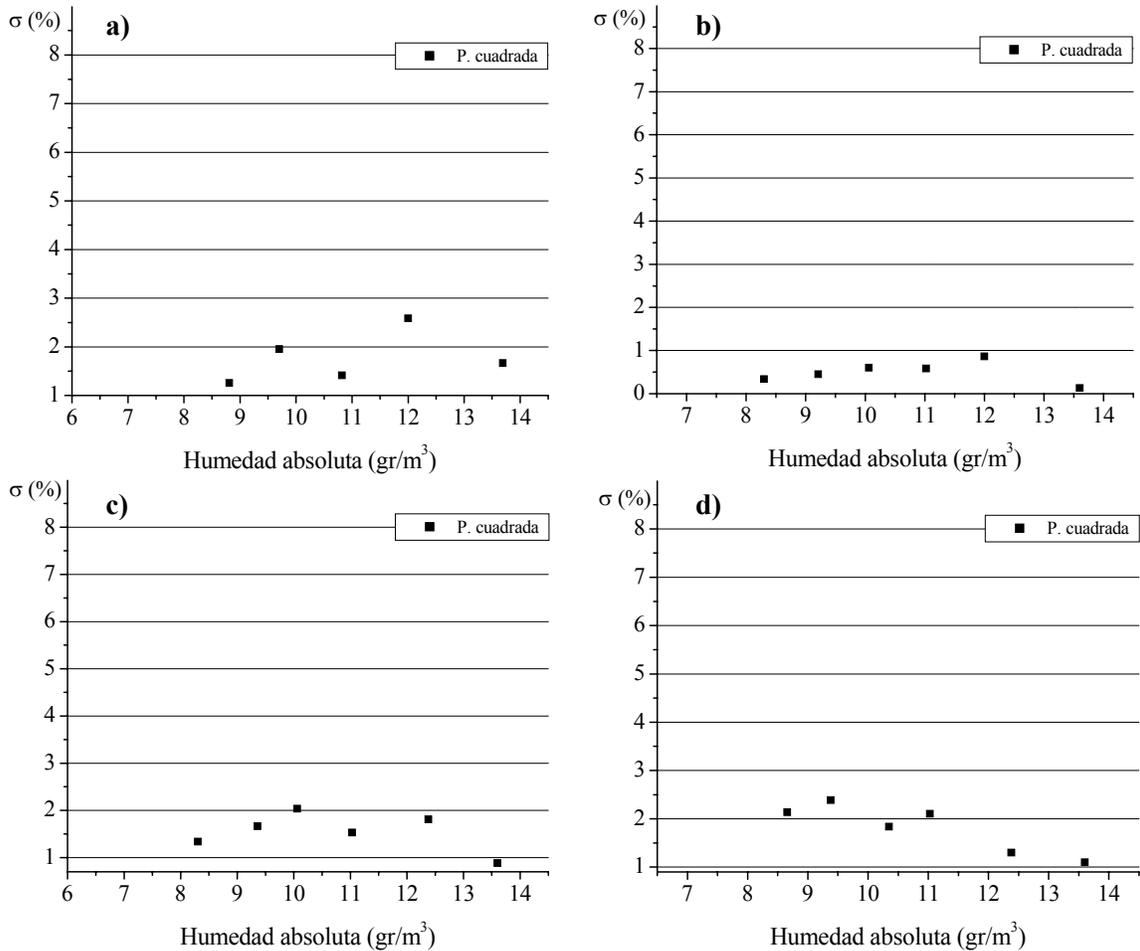


Figura 3.3.10 Desviación estándar de los valores de ruptura experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en función de la humedad para los claros de a) 0.03m, b) 0.06m, c) 0.09m y d) 0.12m.

Se observa que este electrodo punta presenta una menor desviación estándar de sus resultados en comparación con el electrodo de punta cónica.

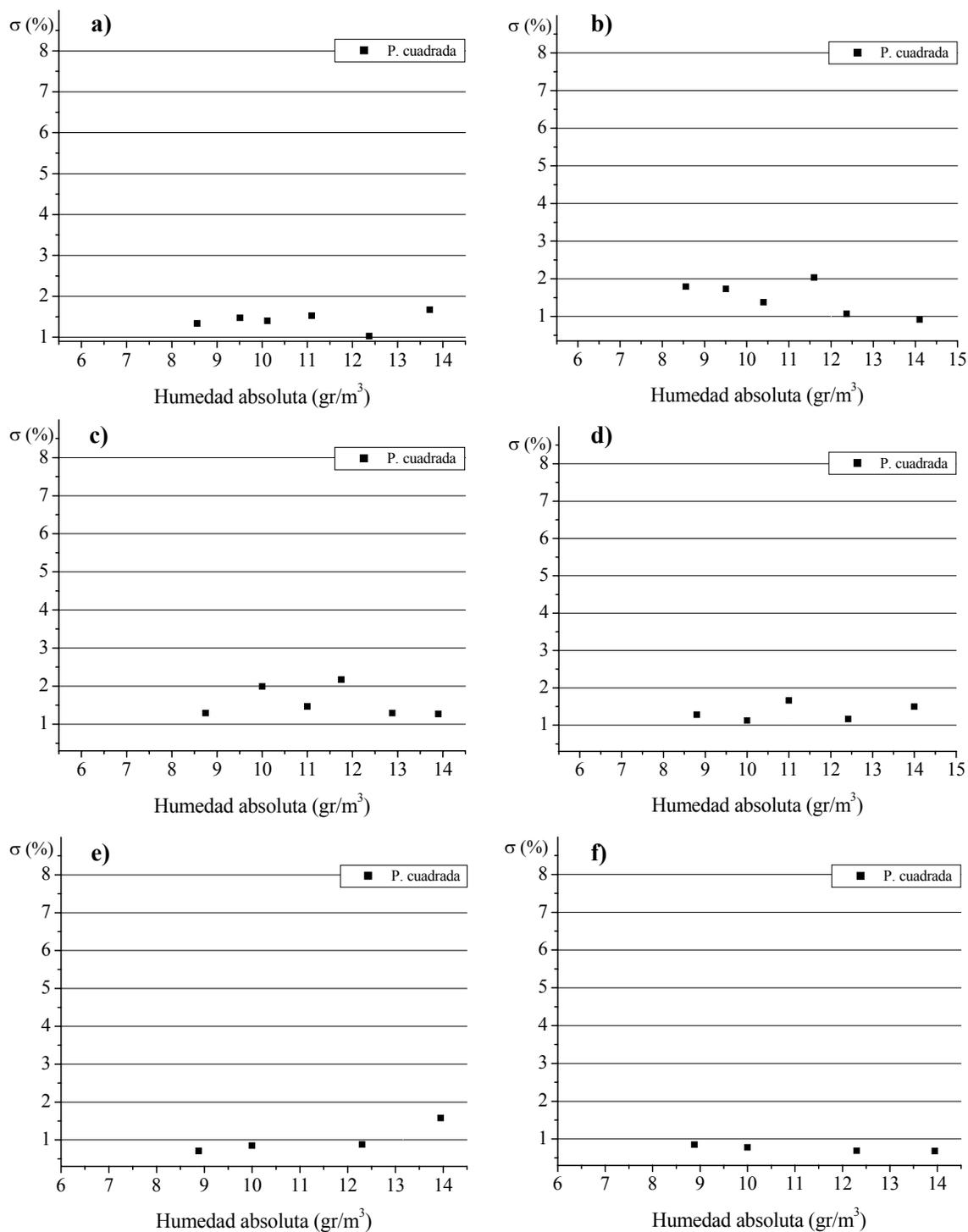


Figura 3.3.11 Desviación estándar de los valores de ruptura experimentales para el arreglo punta cuadrada-plano en función de la humedad para los claros de a) 0.15m, b) 0.18m, c) 0.21m, d) 0.24m, e) 0.27m y f) 0.30m.

3.4 PUNTA SEMIESFÉRICA-PLANO

De los valores de tensión de ruptura obtenidos en laboratorio se obtuvieron, de manera similar al arreglo punta cónica-plano, los valores del campo de propagación de los streamers a condiciones estándar de humedad absoluta (V_{b11}/d) que se muestran en la tabla 3.4.1. La gráfica 3.4.1 representa el comportamiento del campo en función de la separación entre el electrodo punta y el plano. Puede observarse el mismo comportamiento de dicho campo en función de la distancia interelectródica.

Tabla 3.4.1 Campo de eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano en corriente directa con polaridad negativa en función del claro entre el electrodo punta y el plano.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)
0.09	1147.44
0.12	1150.00
0.15	1106.67
0.18	1098.47
0.21	1072.90
0.24	1066.71
0.27	1060.07
0.30	1045.50
0.36	1037.09
0.36	1029.75

Aplicando el procedimiento de corrección dado en (2) al ajuste de la ecuación 3.2.1 se obtiene la tabla 3.4.2. La gráfica 3.4.2 muestra la comparación del campo de propagación para el electrodo de punta semiesférica y aquél obtenido con 3.2.2. Los valores de tensión de ruptura para éste arreglo difieren de los calculados hasta en un 14.48%.

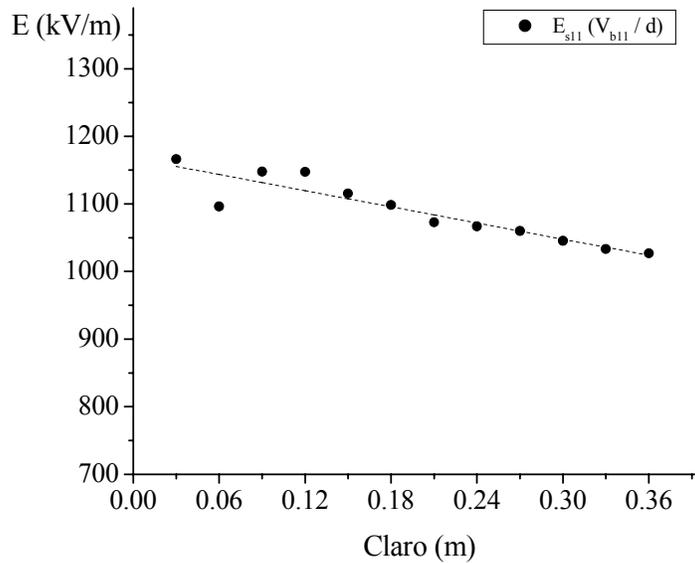


Figura 3.4.1 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano obtenido con la relación V_{b11}/d en función del claro entre electrodos.

La tabla 3.4.2 también muestra el factor por el cual debe de multiplicarse el modelo dado en 3.2.2 para obtener el campo de propagación de los streamers para el electrodo de punta semiesférica. El comportamiento de éste factor se muestra en la figura 3.4.3.

Tabla 3.4.2 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el electrodo de punta semiesférica obtenidos mediante la relación V_{b11}/d y los calculados con el modelo 3.2.2.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)	Ec. 3.2.2 (kV/m)	Factor de claro	Dif (%)
0.09	1147.44	1224.14	0.94	-9.94
0.12	1150.00	1194.18	0.95	-14.48
0.15	1106.67	1164.23	0.96	-6.68
0.18	1098.47	1134.27	0.97	-3.84
0.21	1072.90	1104.32	0.99	-5.20
0.24	1066.71	1074.36	1.00	-3.26
0.27	1060.07	1044.41	1.01	-2.93
0.30	1045.50	1014.45	1.03	-0.72
0.33	1037.09	984.50	1.05	1.48
0.36	1029.75	954.54	1.07	2.97

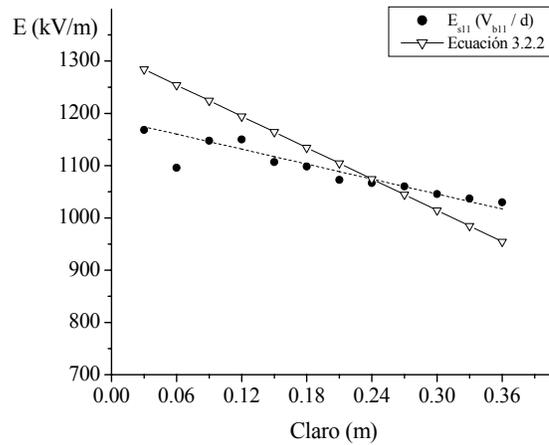


Figura 3.4.2 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano obtenido con la relación V_{b11}/d y el calculado con el modelo 3.2.2 en función del claro.

De las figuras 3.4.2 y 3.4.3 se observa que la diferencia entre el campo de propagación para el electrodo de punta semiesférica y el electrodo de punta cónica tiende a aumentar conforme el claro es mayor; para calcular el campo de propagación para el electrodo de punta semiesférica únicamente es necesario multiplicar el modelo para el arreglo punta cónica-plano por un factor de claro (S).

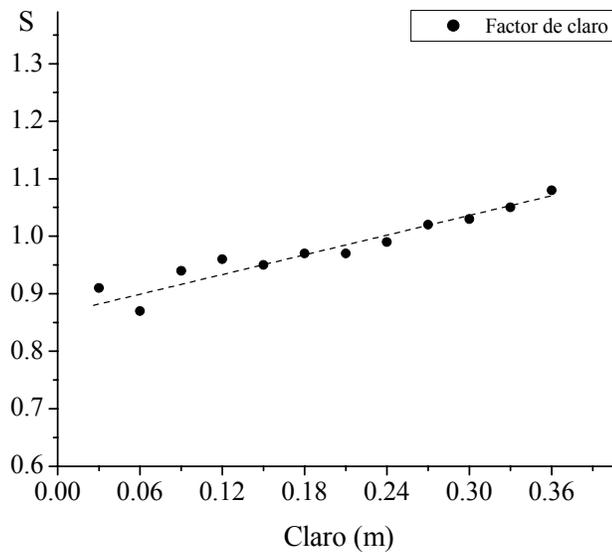


Figura 3.4.3 Factor de claro para el arreglo puntasemiesférica-plano con polaridad negativa.

Considerando el factor de claro en base a la figura anterior, el campo eléctrico de propagación de los streamers para éste arreglo se calcula:

$$E_s = E_{s0} k_1 S \quad (3.4.1)$$

$$S = 0.49d + 0.88$$

En la tabla 3.4.3 se observa que la diferencia máxima entre el campo de propagación para el arreglo punta cuadrada-plano en comparación con aquéllos obtenidos empleando el factor de claro es de 1.98%. La gráfica 3.4.4 muestra que aplicando el factor de claro, los valores tienden a ser más exactos.

Tabla 3.4.3 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica-plano obtenido con la relación V_{b11}/d y calculado con la ecuación 3.4.1.

Claro (m)	E_{s11} (kV/m)	E_c 3.4.1 (kV/m)	Dif (%)
0.09	1147.44	1137.16	0.90
0.12	1150.00	1127.18	1.98
0.15	1106.67	1116.31	-0.87
0.18	1098.47	1104.55	-0.55
0.21	1072.90	1091.88	-1.77
0.24	1066.71	1078.33	-1.09
0.27	1060.07	1063.87	-0.36
0.30	1045.50	1048.53	-0.29
0.33	1037.09	1032.28	0.46
0.36	1029.75	1015.14	1.42

Las tablas 3.4.4 y 3.4.5 muestran la tensión de ruptura para este arreglo punta plano para distintos puntos de humedad absoluta y los claros en estudio.

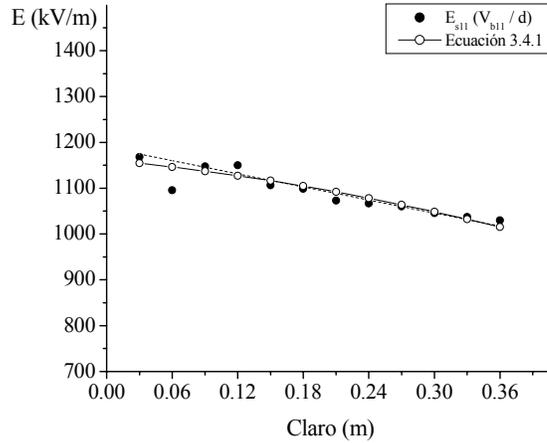


Figura 3.4.4 Campo eléctrico de propagación de los streamers negativos para el arreglo punta semiesférica–plano obtenido mediante la relación V_{b11}/d y calculados con la ecuación 3.4.1 en función del claro.

Tabla 3.4.4 Tensiones de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica–plano en corriente directa con polaridad negativa a distintos puntos de humedad absoluta, para claros de 0.03 a 0.18 m.

Claro = 0.03 m		Claro = 0.06 m		Claro = 0.09 m	
h (gr/m ³)	V _b exp(kV)	h (gr/m ³)	V _b exp(kV)	h (gr/m ³)	V _b exp(kV)
6.60	41.99	7.10	77.68	6.95	109.95
7.76	35.81	8.15	68.87	8.15	105.30
8.80	36.94	8.80	67.16	8.65	105.00
9.89	34.18	9.89	66.05	9.70	103.25
11.11	33.82	11.11	63.98	11.25	102.00
12.55	34.81	12.55	65.28	12.55	102.20
13.60	33.46	13.60	61.89	13.60	101.80
Claro = 0.12 m		Claro = 0.15 m		Claro = 0.18 m	
h (gr/m ³)	V _b exp(kV)	h (gr/m ³)	V _b exp(kV)	h (gr/m ³)	V _b exp(kV)
7.30	141.25	6.50	171.35	6.50	199.90
8.65	142.25	7.85	170.70	7.68	200.35
9.80	139.40	8.87	168.00	8.90	200.85
11.25	136.40	9.35	169.95	9.14	198.60
12.55	136.70	10.65	165.60	9.20	201.35
13.60	133.80	12.00	167.70	10.66	197.50
--	--	13.42	165.10	12.00	195.90

Tabla 3.4.5 Tensiones de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica–plano con corriente directa en polaridad negativa a distintos puntos de humedad absoluta, para claros de 0.21 a 0.36 m

Claro = 0.21 m		Claro = 0.24 m		Claro = 0.27 m	
h (gr/m³)	V_b exp(kV)	h (gr/m³)	V_b exp(kV)	h (gr/m³)	V_b exp(kV)
6.26	227.15	6.46	257.30	6.64	286.90
7.76	230.15	7.10	260.05	7.44	290.25
8.09	225.30	8.48	258.60	8.74	290.30
9.47	230.05	9.55	259.75	9.56	286.10
11.20	223.70	11.00	254.90	11.00	287.30
12.85	222.70	12.56	254.00	13.16	283.50
13.81	223.70	14.12	253.50	--	--
<hr/>					
Claro = 0.30 m		Claro = 0.33 m		Claro = 0.36 m	
h (gr/m³)	V_b exp(kV)	h (gr/m³)	V_b exp(kV)	h (gr/m³)	V_b exp(kV)
6.80	314.30	6.95	345.75	7.38	373.40
8.18	317.05	9.55	346.20	8.45	373.80
9.02	313.20	11.80	341.43	11.80	370.68
9.90	316.40	12.97	335.00	13.20	365.00
11.32	314.10	--	--	--	--
12.97	311.20	--	--	--	--

Empleando el factor de claro obtenido la tensión de ruptura se calcula con 3.2.3:

$$V_b = E_{s0}dk_1S \quad (3.4.2)$$

La figura 3.4.5 muestra la tensión de ruptura para el electrodo de punta semiesférica empleando el modelo 3.4.2 y los obtenidos por medio de los ajustes de los valores experimentales en función del claro entre el electrodo punta y el plano. Se considera el valor de la humedad absoluta igual a 11.00 gr/m³.

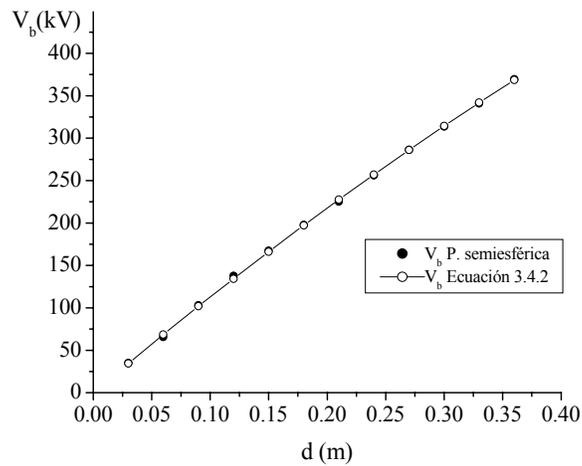


Figura 3.4.5 Tensión de ruptura a 11.00 gr/m³ para el arreglo punta semiesférica–plano en corriente directa con polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.

La tabla y figura 3.4.6 muestran el comportamiento del coeficiente de humedad absoluta sobre la tensión de ruptura para el electrodo punta en estudio, en función de la separación entre el electrodo punta y el plano. A partir de la figura y tabla citadas puede concluirse que el comportamiento del coeficiente de humedad es similar a aquéllos para los electrodos de punta cónica y punta cuadrada; este tiende a disminuir conforma la separación aumenta. Para las separaciones de 0.03, 0.06 y 0.09 m la ruptura fue por chispa.

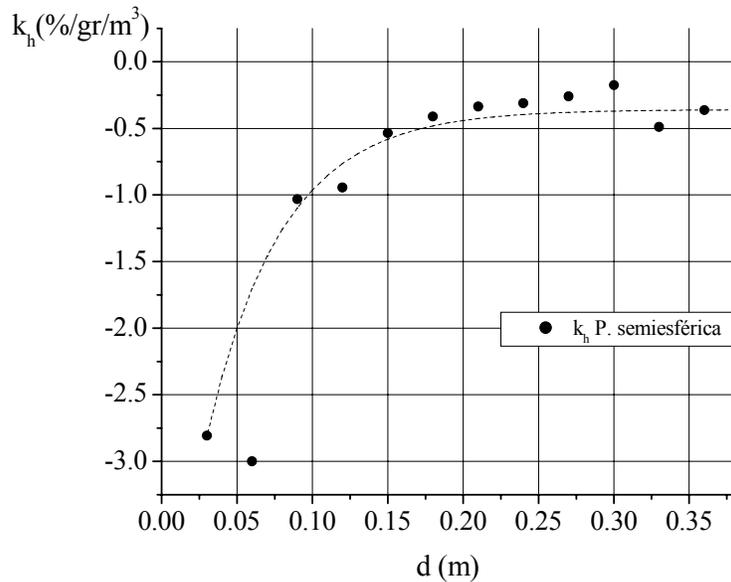


Figura 3.4.6 Coeficiente de humedad para el arreglo punta semiesférica–plano en corriente directa en polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.

Tabla 3.4.6 Coeficiente de humedad para el arreglo punta semiesférica–plano en corriente directa con polaridad negativa en función de la separación entre el electrodo punta y el plano.

d (m)	$k_h \text{ exp}(\%/gr/m^3)$	d (m)	$k_h \text{ exp}(\%/gr/m^3)$
0.03	-2.806	0.21	-0.336
0.06	-3.000	0.24	-0.312
0.09	-1.031	0.27	-0.260
0.12	-0.944	0.30	-0.176
0.15	-0.535	0.33	-0.496
0.18	-0.411	0.36	-0.364

En las tablas y figuras 3.4.7 y 3.4.8 se observa la diferencia entre las tensiones de ruptura experimentales y las calculadas empleando la expresión 3.4.2.

Tabla 3.4.7 Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad negativa, en función de la humedad absoluta.

Claro = 0.03 m				Claro = 0.06 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)
6.60	41.99	34.67	17.44	7.10	77.68	68.47	11.86
7.76	35.81	34.67	3.19	8.15	68.87	68.47	0.58
8.80	36.94	34.67	6.15	8.80	67.16	68.47	-1.95
9.89	34.18	34.67	-1.43	9.89	66.05	68.47	-3.66
11.11	33.82	34.67	-2.51	11.11	63.98	68.47	-7.02
12.55	34.81	34.67	0.41	12.55	65.28	68.47	-4.88
13.60	33.46	34.67	-3.61	13.60	61.89	68.47	-10.63
Claro = 0.09 m				Claro = 0.12 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)
6.95	107.95	102.46	4.56	7.30	141.25	134.70	4.64
8.15	105.30	102.46	2.70	8.65	142.25	134.70	4.31
8.65	105.00	102.46	2.42	9.80	139.40	134.70	3.37
9.70	103.25	102.46	0.77	11.25	136.40	134.70	1.24
11.25	102.00	102.46	-0.45	12.55	136.70	134.70	1.46
12.55	102.20	102.46	-0.25	13.60	133.80	134.70	-0.67
13.60	101.80	102.46	-0.65	--	--		

Tabla 3.4.8 Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica-plano con polaridad negativa, en función de la humedad absoluta.

Claro = 0.15 m				Claro = 0.18 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)
6.50	171.35	167.64	2.16	6.50	199.90	198.04	0.93
7.85	170.70	167.64	1.79	7.68	200.35	198.04	1.16
8.87	168.00	167.64	0.21	8.90	200.85	198.04	1.40
9.35	169.95	167.64	1.36	9.14	198.60	198.04	0.28
10.65	165.60	167.64	-1.23	10.66	197.50	198.04	1.65
12.00	167.70	167.64	0.03	12.00	195.90	198.04	-0.27
13.42	165.10	167.64	-1.54	13.91	198.00	198.04	-1.09
Claro = 0.21 m				Claro = 0.24 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)
6.26	227.15	229.58	-1.07	6.46	257.30	257.84	-0.21
7.76	230.15	229.58	0.25	7.10	260.05	257.84	0.85
8.90	225.30	229.58	-1.90	8.48	258.60	257.84	0.29
9.47	230.05	229.58	0.20	9.55	259.75	257.84	0.74
11.20	223.70	229.58	-2.63	11.00	254.90	257.84	-1.15
12.85	222.70	229.58	-3.09	12.56	254.00	257.84	-1.51
13.81	223.70	229.58	-2.63	14.12	253.50	257.84	-1.71
Claro = 0.27 m				Claro = 0.30 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)
6.64	286.90	287.62	-0.25	6.80	314.30	313.45	0.27
7.44	290.25	287.62	0.91	8.18	317.05	313.45	1.14
8.74	290.30	287.62	0.92	9.02	313.20	313.45	-0.08
9.56	286.10	287.62	-0.53	9.90	316.40	313.45	0.93
11.00	287.30	287.62	-0.11	11.32	314.10	313.45	0.21
13.16	283.50	287.62	-1.45	12.97	311.20	313.45	-0.72
Claro = 0.33 m				Claro = 0.36 m			
h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)	h(gr/m ³)	V _b exp(kV)	V _b calc(kV)	Dif(%)
6.95	345.75	341.11	1.34	7.38	373.40	364.24	2.45
9.55	346.20	341.11	1.47	8.45	373.80	364.24	2.56
11.8	341.43	341.11	0.09	11.80	370.68	364.24	1.74
12.97	335.00	341.11	-1.82	13.20	365.00	364.24	0.21

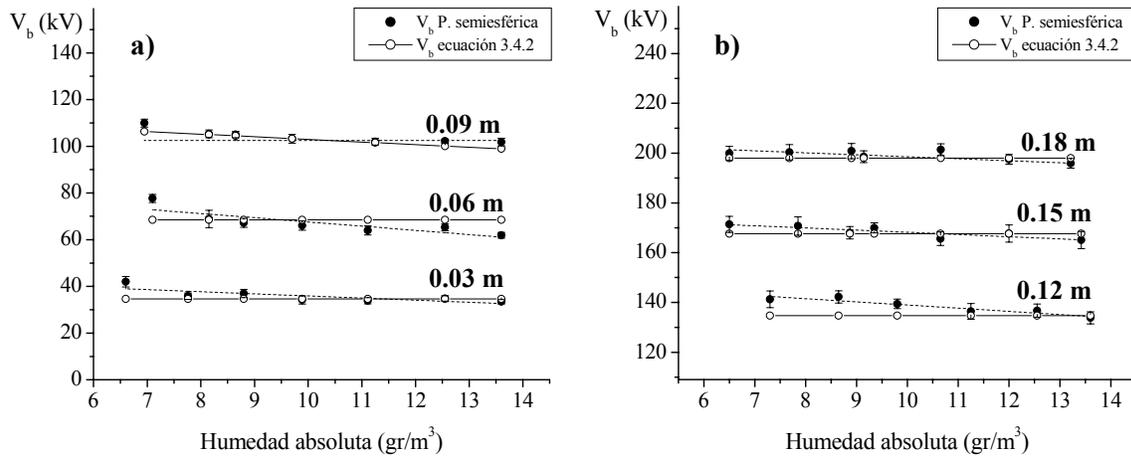


Figura 3.4.7 Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica–plano en polaridad negativa, en función de la humedad absoluta.

Al aplicar el modelo descrito en la ecuación 3.4.2 los valores calculados tienden a ser más exactos en relación con los experimentales; la diferencia máxima que se presenta es de 4.64%. Al igual que los arreglos anteriores, el modelo aplica para separaciones interelectródicas a partir de 0.09 m, ya que para separaciones menores la ruptura es por chispa y no por streamers.

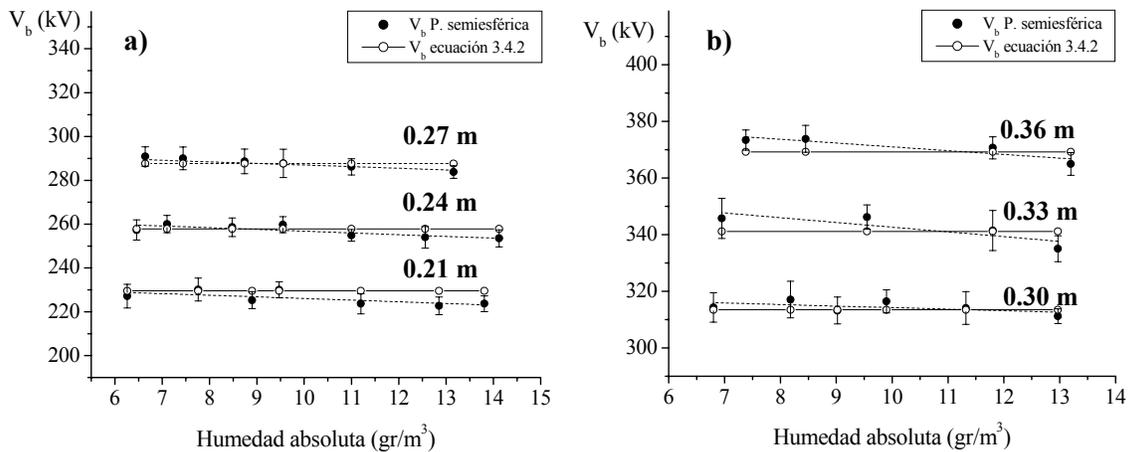


Figura 3.4.8 Tensiones de ruptura experimentales y calculadas empleando la ecuación 3.4.2 para el arreglo punta semiesférica–plano en polaridad negativa en función de la humedad absoluta.

Empleando el procedimiento de la Norma Internacional IEC-60, los valores calculados difieren con respecto a los valores experimentales hasta 15%. Al igual que para el arreglo punta cuadrada-plano, los valores experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano son mayores que aquellos calculados con la Norma Internacional IEC-60. La tabla 3.4.9 muestra los valores experimentales y calculados con la IEC-60 para el arreglo punta semiesférica-plano en polaridad negativa para una altitud de 2240 msnm para dos distintos claros y a diferentes puntos de humedad absoluta. La representación gráfica de estos valores de tensión de ruptura se muestra en la figura 3.4.9.

Tabla 3.4.9 Valores de tensión de ruptura calculados empleando la ecuación 3.4.2 y la Norma Internacional IEC-60 a 2240 msnm a distintos puntos de humedad absoluta, para el arreglo punta semiesférica-plano con polaridad negativa.

Claro = 0.20m			Claro = 0.40m		
h(gr/m³)	Ec. 3.4.2 (kV)	V_b IEC(kV)	h(gr/m³)	Ec. 3.4.2 (kV)	V_b IEC(kV)
7.00	219.24	192.50	7.00	396.36	338.80
8.00	219.24	192.50	8.00	396.36	338.80
9.00	219.24	192.50	9.00	396.36	338.80
10.00	219.24	192.50	10.00	396.36	338.80
11.00	219.24	192.50	11.00	396.36	338.80
12.00	219.24	192.50	12.00	396.36	338.80
13.00	219.24	192.50	13.00	396.36	338.80
14.00	219.24	192.50	14.00	396.36	338.80

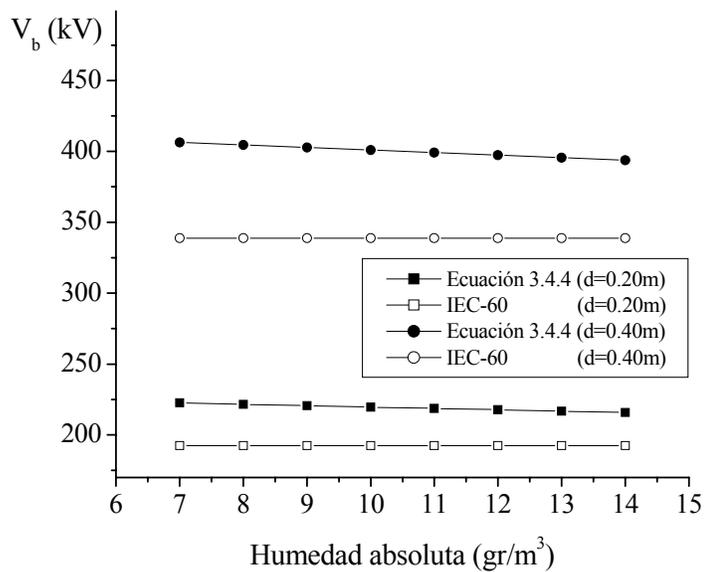


Figura 3.4.9 Valores de tensión de ruptura calculados con la ecuación 3.4.2 y la Norma Internacional IEC-60 para el arreglo punta semiesférica–plano con polaridad negativa.

Puede observarse en las figuras 3.4.10-3.4.12 que la desviación estándar de los valores de ruptura tiende a disminuir con el claro entre electrodos.

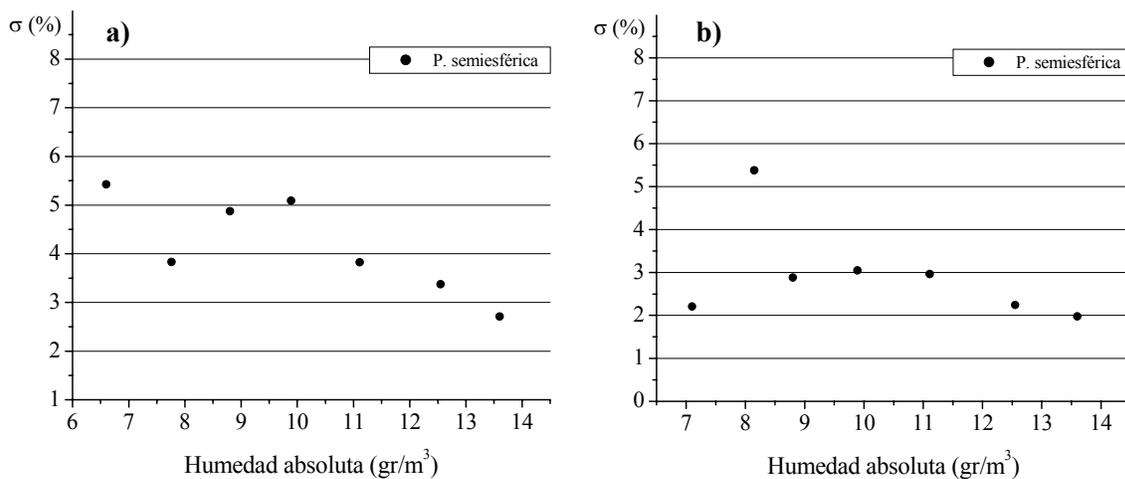


Figura 3.4.10 Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales el arreglo punta semiesférica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a)0.03 m, b)0.06 m.

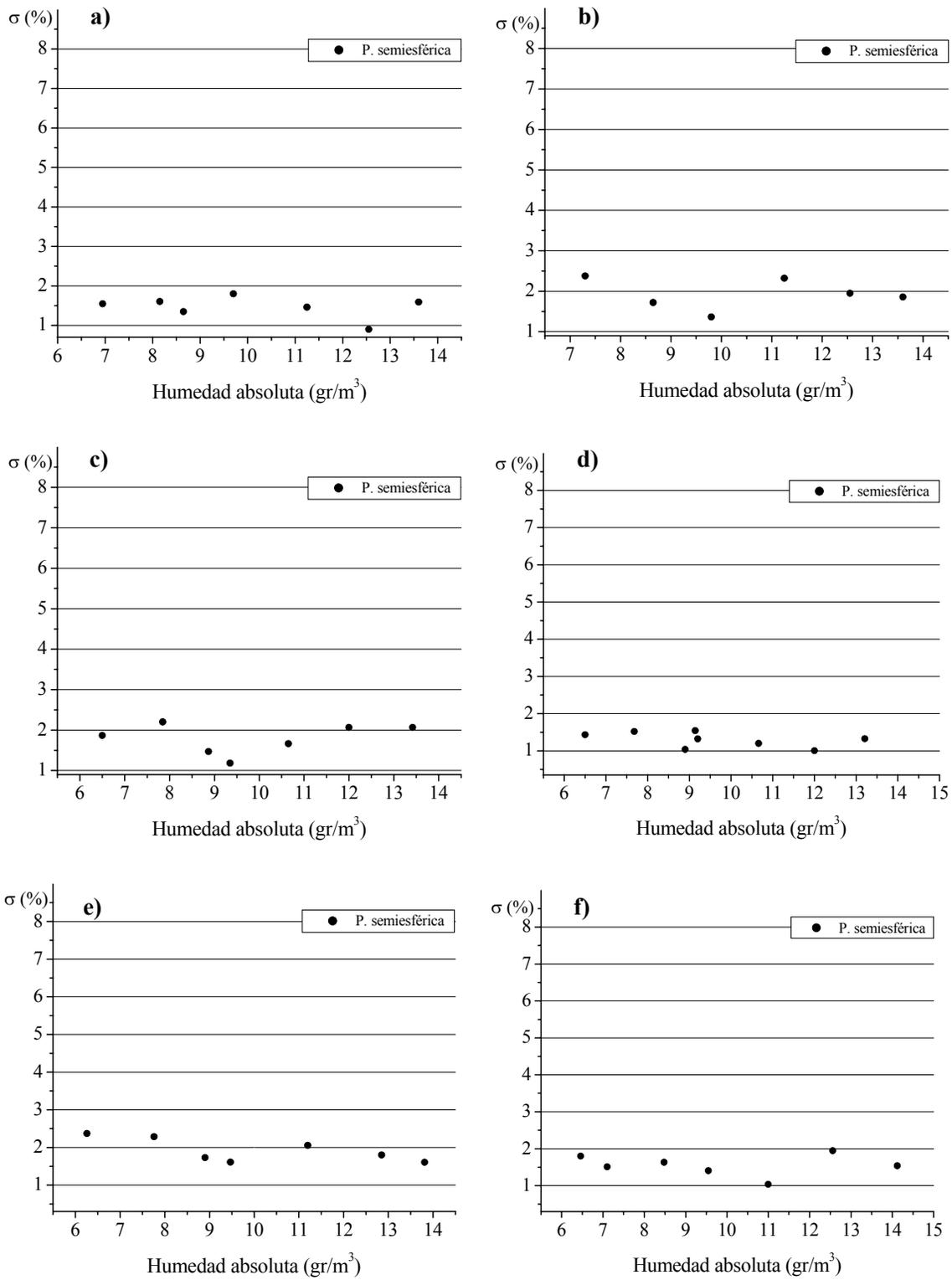


Figura 3.4.11 Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.09 m, b) 0.12 m, c) 0.15 m, d) 0.18 m, e) 0.21 m y f) 0.24 m.

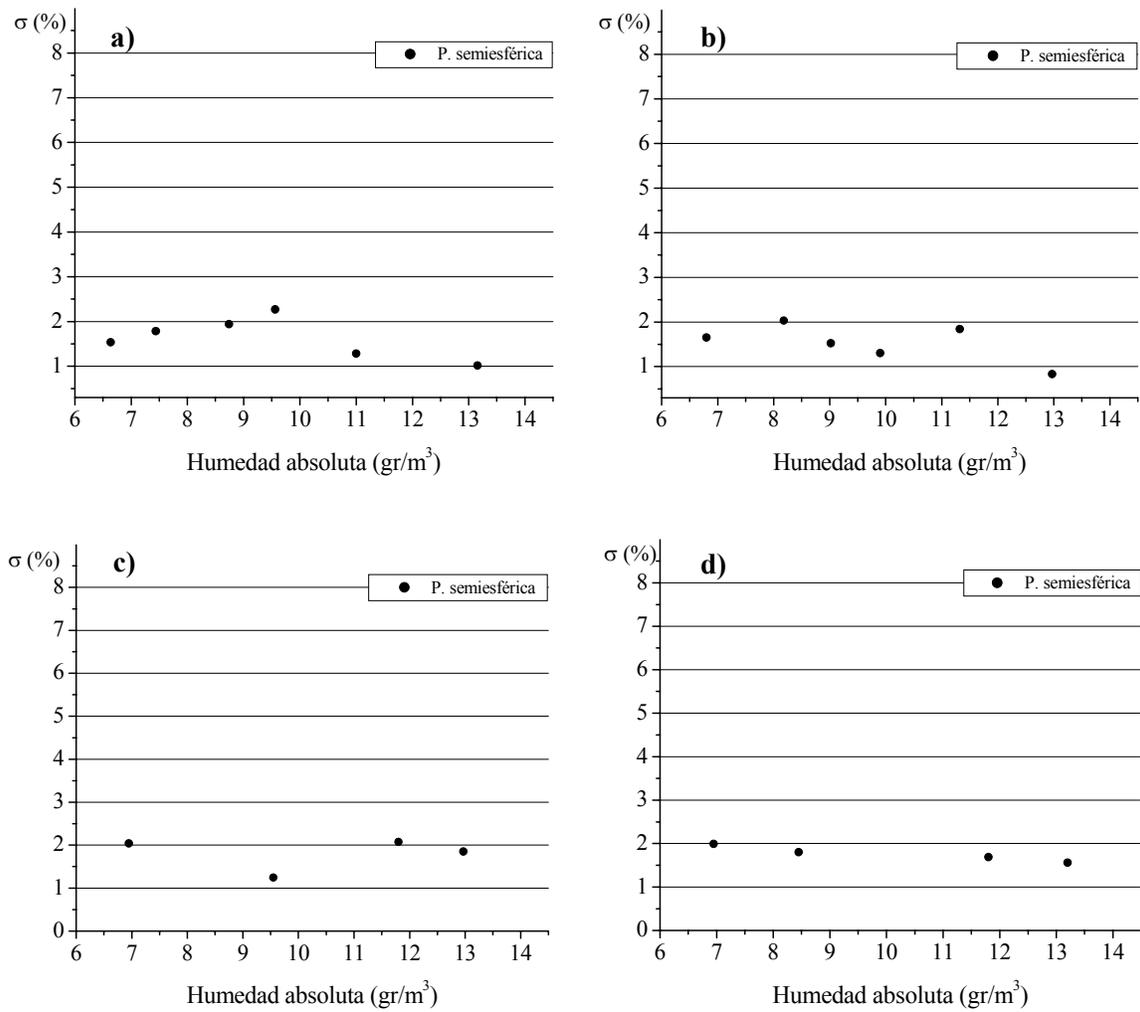


Figura 3.4.12 Desviación estándar de los valores de tensión de ruptura experimentales para el arreglo punta semiesférica-plano en función de la humedad absoluta para los claros de a) 0.27 m, b) 0.30 m, c) 0.33 m y d) 0.36 m.

3.5 INFLUENCIA DEL PERFIL DE LOS ELECTRODOS

La figura 3.5.1 muestra la tensión de ruptura para los tres electrodos punta analizados en el presente capítulo en función del claro. Se observa que para las separaciones entre el electrodo punta y el plano de 0.03 y 0.06 m, la tensión de ruptura (contrario a lo que sucede en polaridad positiva) tiende a ser de la misma magnitud. Conforme la separación es mayor esta tendencia se mantiene para los electrodos con terminación cónica y semiesférica, no así para la punta cuadrada donde sus valores de ruptura son cada vez mayores en comparación con los otros dos electrodos.

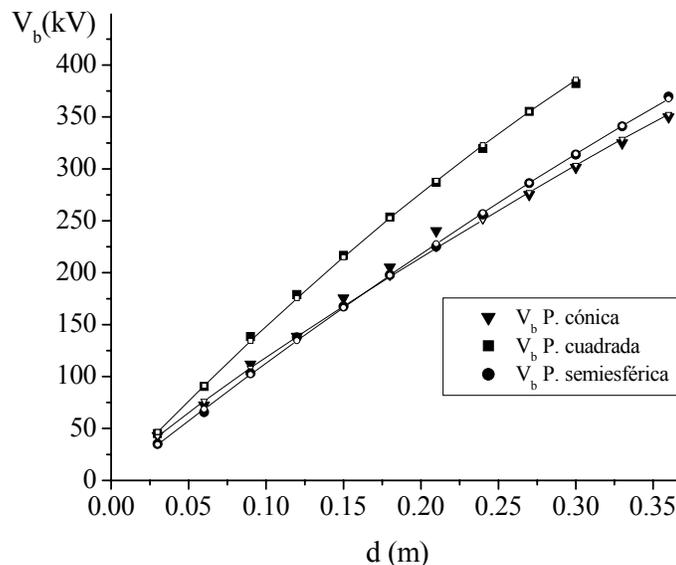


Figura 3.5 Tensiones de ruptura experimentales y calculadas para los tres perfiles de electrodo punta empleados a un valor de 11.00 gr/m^3 , en función del claro.

A nivel del mar Allen et al. [9] reportaron que la tensión de ruptura para separaciones de 0.20 m es de 250kV y 290kV para los electrodos de punta semiesférica y punta cuadrada respectivamente. Para el claro de 0.40 m estas son de 440kV para la punta semiesférica y 540kV para la punta cuadrada. Así para el claro de 0.20 m la tensión de ruptura del electrodo de punta semiesférica es el 82.2% de la

magnitud de la tensión de ruptura del electrodo de punta cuadrada. Esta relación se mantiene para el claro de 0.40 m. Este valor concuerda con los resultados obtenidos a 2240 msnm. Con $\delta=0.77$ la magnitud de la tensión de ruptura del arreglo punta semiesférica-plano es el 81% de la magnitud de ruptura para el arreglo punta cuadrada-plano. Entonces, la influencia del perfil del electrodo se conserva a gran altitud ($\delta=0.77$).

Aunque no se ha demostrado es de esperarse que para claros mayores la tensión de ruptura tienda a ser de la misma magnitud promedio sin importar el perfil del electrodo punta.

3.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al igual que en polaridad positiva las tensiones de ruptura a nivel del mar son de mayor magnitud en comparación con aquéllas obtenidas a una altitud de 2240 msnm ($\delta=0.77$). Esto se debe a que la trayectoria libre media depende de la presión.

La tensión de ruptura se reduce al incrementar la humedad absoluta para los tres perfiles de electrodo punta utilizados, sin embargo cómo se demostró esta disminución no es significativa por lo que no se considera la corrección por humedad absoluta; esto para el intervalo de humedad absoluta analizado (5-14 gr/m^3). Allen et al [8] reportan que a nivel del mar con humedades desde 5 a 40 gr/m^3 la tensión de ruptura no se ve afectada por la humedad absoluta.

La tensión de ruptura para este arreglo tiende a ser de la misma magnitud en comparación con los electrodos de punta cónica y punta cuadrada para el claro de 0.03 m, conforme ésta separación aumenta, la diferencia entre las tensiones de ruptura es cada vez mayor (figura 3.4.5). Sin embargo, al igual que en polaridad positiva, es de esperarse que para separaciones mayores el perfil del electrodo punta deje de ser un parámetro para determinar el valor de la tensión de ruptura.

Cuando la desviación estándar es mayor al 2 % la descarga es por chispa, mientras que cuando la desviación estándar es menor al 2 % el mecanismo de la ruptura fue por streamers.

3.7 CONCLUSIONES

Los tres arreglos punta-plano presentados en este trabajo son una buena alternativa para emplearse como vóltmetros de tensiones de corriente directa con polaridad negativa a grandes altitudes sobre el nivel del mar. Esto para el intervalo de humedad absoluta de 5 a 14 gr/m³ y para claros de 0.09 para los electrodos de punta cónica y punta semiesférica. Para el electrodo de punta cuadrada para separaciones a partir de 0.06 m. Estos arreglos presentan una dependencia bien definida del campo de propagación de los streamers contra el claro entre electrodos; además, de manera general, la desviación estándar de sus valores de ruptura es pequeña (<2%) para separaciones entre el electrodo punta y el plano a partir de 0.15 m. Sin embargo debido a que el electrodo de punta cuadrada tiene un mejor comportamiento en polaridad positiva se recomienda éste como vóltmetro de altas tensiones con corriente directa en ambas polaridades para bajas y grandes altitudes.

Tanto el electrodo de punta cónica como el electrodo de punta semiesférica, presentan una gran desviación estándar de sus valores de ruptura para los claros de 0.03 y 0.06 m; para el electrodo de punta cuadrada este fenómeno se presenta para la separación de 0.03 m; esto se debe a que la ruptura es por chispa. Para separaciones mayores la ruptura es por streamers con lo cual la desviación estándar disminuye.

Para las separaciones de 0.03 y 0.06 m existe una fuerte influencia de la humedad absoluta sobre la tensión de ruptura. Para separaciones a partir de 0.09 m el coeficiente de humedad absoluta tiende a un valor constante, aunque dependiente del perfil del electrodo punta, indicando que la influencia de la humedad sobre la tensión de ruptura es constante. De acuerdo a lo reportado a nivel del mar, es de esperarse que el coeficiente de humedad continúe disminuyendo hasta llegar a ser cercano a cero. Así mismo, al aumentar la humedad absoluta la pendiente de las curvas de tensión de ruptura contra humedad absoluta tendera a ser igual a cero, indicando que la tensión de ruptura no depende de la humedad absoluta. Por lo tanto, para efectos de corrección con tensiones de corriente directa con polaridad negativa la corrección por humedad absoluta tanto a bajas como a grandes altitudes no se considera necesaria. Mientras que la corrección por densidad relativa del aire debe continuar considerándose.

El modelo de la ecuación 3.2.2 ajusta a los datos experimentales considerando que el factor de claro para el electrodo de punta cónica es igual a 1, para el electrodo de punta cuadrada 1.25 y para el arreglo punta semiesférica-plano sea $0.49d+0.88$. Para los electrodos de punta cónica y punta semiesférica con claros a partir de 0.09 m el error máximo entre los valores de tensión calculados y experimentales es de 4.49% y 2.82%, respectivamente. Para el electrodo de punta cuadrada el error máximo es de 3.83% para separaciones mayores a 0.06m.

CONCLUSIONES GENERALES

Para polaridad positiva, los resultados muestran que los arreglos punta cónica-plano y punta cuadrada-plano se pueden utilizar como herramientas en la medición de altas tensiones con corriente directa, en el intervalo de humedad absoluta de 8 a 14.2 gr/m³ y claros desde 0.20 m hasta 1.00 m. La desviación estándar de sus valores de ruptura son confiables ya que estos son menores al 2 %. Sin embargo, se concluye que el arreglo punta cuadrada-plano es la mejor alternativa para emplearse como voltmetro de corriente directa, tanto a bajas como a grandes altitudes, ya que presenta un intervalo mayor de linealidad de la tensión de ruptura contra humedad absoluta y claro.

Para efectos de corrección de tensiones corriente directa con polaridad positiva el modelo de la referencia [2] se validó para los electrodos punta cuadrada y punta semiesférica considerando los factores de claro de $1.01d^{-0.10}$ y $0.96d^{-0.33}$, respectivamente. Al igual que la Norma Internacional IEC-60, considera necesarias las correcciones por humedad absoluta y por densidad relativa del aire, aunque el procedimiento de corrección difiere del que emplea la norma citada. El modelo dado en [2] queda entonces como:

$$V_b = E_s d [k_1 + k_2] S$$

E_s es el campo eléctrico de propagación de los streamers positivos a condiciones atmosféricas estándar; d es el claro, k_1 y k_2 son los factores de corrección por densidad relativa del aire y humedad absoluta; S es el factor de claro. Por lo tanto es necesario llevar a cabo pruebas experimentales para otros electrodos punta así como otras configuraciones electrónicas (conductor-ventana, conductor-plano, conductor-estructura y punta-punta). También se requiere determinar los límites de linealidad. Con esto, el modelo dado en [2] sustituiría al procedimiento de corrección que utiliza la Norma IEC-60 para corregir tensiones de cd con polaridad positiva.

La tensión de ruptura con $\delta = 0.77$ y polaridad positiva tiende a ser de la misma magnitud (diferencia del 4%) para los claros a partir de 0.80 m sin importar el electrodo punta que se emplee; este fenómeno a nivel del mar se reporto que sucede para separaciones a partir de 0.50 m. Por lo tanto la influencia del electrodo punta sobre la tensión de ruptura cambia con la altitud.

Para polaridad negativa los resultados muestran que los tres arreglos que se analizaron se pueden utilizar como herramientas en la medición de altas tensiones con cd, en el intervalo de humedad de 6.5 a 14.2 gr/m³ y claros desde 0.09 hasta 0.36 m, para los arreglos punta cónica-plano y punta semiesférica-plano; Para la configuración punta cuadrada-plano para separaciones de 0.06 hasta 0.30 m. La desviación estándar de sus valores de ruptura son confiables, en el intervalo de claro y humedad absoluta citados, ya que estos son menores al 2 %. Sin embargo, se concluye que de los tres arreglos que se analizaron, el arreglo punta cuadrada-plano es la mejor alternativa para emplearse como vóltmetro de corriente directa ya que para polaridad positiva presenta ventajas sobre los otros dos.

Para efectos de corrección de tensiones corriente directa con polaridad negativa el modelo de la referencia [2] se validó para los electrodos punta cuadrada y punta semiesférica considerando los factores de claro de 1.25 y $0.49+0.88d$, respectivamente. Al igual que la Norma Internacional IEC-60, los resultados experimentales muestran que la corrección por humedad absoluta para bajas y grandes altitudes no es necesaria. Por lo tanto el modelo dado en [2] queda entonces como:

$$V_b = E_s d [k_1 + k_2] S$$

E_s es el campo eléctrico de propagación de los streamers positivos a condiciones atmosféricas estándar; d es el claro, k_1 es el factor de corrección por densidad relativa del; S es el factor de claro. Al igual que en polaridad positiva, es necesario llevar a cabo pruebas experimentales para otros electrodos punta así como otras

configuraciones para contar con los factores de claro que permitan validar el modelo para otras configuraciones electrónicas. También se requiere determinar los límites de linealidad. Con esto el modelo dado en [2] sustituiría al procedimiento de corrección que utiliza la Norma IEC-60 para corregir tensiones de cd con polaridad negativa.

Se observó que el mecanismo de descarga por streamers estuvo presente para separaciones a partir de 0.09 m al utilizar el arreglo punta semiesférica-plano; al nivel del mar se considera que la descarga es por streamers para separaciones a partir de 0.01 m. Por lo tanto se muestra un corrimiento en las curvas a las cuales se presenta la descarga por streamers debido a la influencia de la densidad relativa del aire.

Como una conclusión final se establece el siguiente procedimiento para corregir altas tensiones de corriente directa en laboratorios de prueba, considerando las condiciones atmosféricas presentes. Cualquier tensión de ruptura V_b se relaciona a las condiciones atmosféricas estándar a través de la expresión:

$$V_b = E_s d [k_1 + k_2] S$$

Donde:

V_b = tensión de ruptura, en kV, a cualquier condición atmosférica.

E_s = campo eléctrico de propagación de los streamers (positivos o negativos) a condiciones atmosféricas estándar (humedad absoluta 11 gr/m³ y densidad relativa del aire 1) . Para polaridad positiva éste es de 500 kV/m; para polaridad negativa esta dado por 1476.4-1121.91d.

d = distancia axial entre el electrodo punta y el plano, en m.

k_1 = factor de corrección por densidad relativa del aire; para ambas polaridades éste es $k_1 = \delta^m$. Para polaridad positiva $m = 1.4$ y para polaridad negativa $m = 0.44$. δ es la densidad relativa del aire; se calcula con la relación:

$$\delta = \frac{b}{b_0} \frac{273+t_0}{273+t}$$

b y t , son la presión barométrica (en kPa) y la temperatura (en $^{\circ}\text{C}$) a las condiciones atmosféricas presentes, mientras que b_0 y t_0 , son la presión barométrica y la temperatura a condiciones atmosféricas estándar (101.3 kPa y 20 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente).

k_2 = factor de corrección por humedad absoluta; para polaridad positiva se considera $k_2 = 1.3\delta^{-0.83}[h-11]/100$. Para polaridad negativa ésta corrección no se considera necesaria, por lo tanto $k_2 = 0$.

h = humedad absoluta medida en gr/m^3 , la cual puede obtenerse de las tablas de vapor de la British Standard mostrada en la figura B del apéndice A.

S es el factor de claro que depende del electrodo punta y polaridad aplicada. Para polaridad positiva se tiene:

$S = 1.0$ para la configuración punta cónica-plano

$S = 1.01d^{-0.10}$ para la configuración punta cuadrada-plano

$S = 0.96d^{-0.33}$ para la configuración punta semiesférica-plano

Para polaridad negativa:

$S = 1.0$ para la configuración punta cónica-plano

$S = 1.25$ para la configuración punta cuadrada-plano

$S = 0.49d+0.88$ para la configuración punta semiesférica-plano

**RECOMENDACIONES
PARA TRABAJOS
FUTUROS**

Validar el modelo de la referencia [2] a intervalos mayores de humedad absoluta y claro. Así mismo, realizar investigaciones con diferentes electrodos punta y configuraciones para obtener los factores de claro que permitan pasar de una configuración a otra y con esto sustituir al procedimiento de corrección para tensiones de corriente directa que emplea actualmente la Norma Internacional IEC-60.

Llevar a cabo investigaciones para el mismo arreglo y ambas polaridades sujetas a las condiciones atmosféricas que se presentan en áreas desérticas; esto con la finalidad de tener información disponible para cuando se habiliten líneas de transmisión con corriente directa en la República Mexicana y éstas tengan que atravesar zonas desérticas como las del norte

REFERENCIAS

- [1] “High Voltage Test Techniques”, Publication 60-1 (2nd edition), IEC 1989.
- [2] Calva P. A. and Espino F. P., “Correction Factors for Positive dc Voltages”, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 5 No. 4, August 1998, pp. 541-544.
- [3] Robledo-Martínez A. and Calva P. A., “DC Breakdown of Rod-rod and Rod-Plane Gaps in Reduced-Density Air” 6th International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, 1989, paper 46.02.
- [4] Calva P. A., “Técnicas de Diagnóstico de Descargas Eléctricas Aplicadas al Estudio de Descargas a Grandes Alturas”, Tesis de doctorado, IPN México 1993.
- [5] Boutlendj M. et al., “Positive DC Corona and Sparkover in Short and Long Rod-Plane Gaps”, IEEE Proceedings-A, vol. 138, No. 1 January 1991, pp 31-36.
- [6] Loeb L. B., “Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases”, Wiley New York.
- [7] Kuffel E. and Zaengl W. S., “High Voltage Engineering”, Pergamon Press, 2nd edition.
- [8] Allen N. L. et al., “Analysis and Comparison of Rod-Plane and Rod-Rod Gap as Direct Voltage Measurement Devices”, IEE Proceedings-A, vol. 139, No. 6, pp 279-284, November 1992.
- [9] Allen N. L., Boutlendj M. and Lightfoot H. A., “Dielectric Breakdown in Non-uniform Field Air Gaps”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 28 No. 2, pp 183-190, April 1993.
- [10] Pignini A. et al., “Influence of Air Density on the Impulse Strength of External Insulation”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, No. 10, October 1985.
- [11] “High Voltage Test Techniques”, Publication 60-1, IEC 1973.
- [12] Feser K., Update on IEC-60 High Voltage Test Technique, CIGRE 33-54(WG03).
- [13] Feser K. and Hughes R. C., “Measurement of Direct Voltage by Rod-Rod Gap”, Electra No. 117, pp 23-24.
- [14] Allen N. L., Fonseca J. R., Geldenhuys H. J. and Zheng J. C., “Humidity influence on non-uniform fields breakdown in air”, Elektra 1991, 67, (134), pp. 63-89.

-
- [15] Allen N. L. and Boutlendj M., “Study of the Electric Fields Required for Streamer Propagation in Humid Air”, IEE Proceedings–A, Vol. 138, No. 1, pp 37–43, January 1991.
- [16] Feser K. and Schmid J., “Influence of Atmospheric Conditions on the Impulse Breakdown of Rod-Plane Gaps”, 5th International Symposium on High Voltage Engineering”, Braunschweig, FRG, 1987, paper 11.01.
- [17] Abraham P. and Prabhakar B., “Effect of Humidity and Temperature on the DC Breakdown of Rod–Rod and Rod–Plane Gaps”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 2, April 1992, pp 207–213.
- [18] Abraham P. and Prabhakar B., “Influence of Humidity on the Breakdown Characteristics of Air-gaps, Under HVDC Application”, 6th International Symposium on High Voltage, New Orleans, LA, USA, 1989, paper 13.03.
- [19] Phelps C. T. and Griffiths R. F., “Dependence of Positive Streamer Propagation on Air Pressure and Water Content”, Journal of Applied Physics, vol. 47, No. 7, pp 2929 –2934, July 1976.
- [20] Long Y. and Xian P., “Dielectric Strength of External Insulation at High Humidity”, 6th International Symposium on High Voltage, New Orleans, LA, USA, 1989, paper 47.24.
- [21] Geldenhuys H. J., “The Positive Streamer Gradient Over a Practical Range of Air Density and Humidity”, CIGRE, report No. 33 – 89(WG03) 18 IWD, 1989.
- [22] Baldo G., “Basic Discharge Phenomena”, Seminar on “Dielectric Strength of External Insulation of Overhead Lines and Substations: Theory and Application”, September 13, Hotel Camino Real. Mexico City (CIGRE SC 33, WG 3307).
- [23] Allen N. L., “Corona, Breakdown and Humidity in the Rod–Plane”, IEE Proceedings vol. 133–A, pp 562–568, February 1986.
- [24] Figura tomada de la tesis de maestría “Dimensión Fractal de Trayectorias de Descargas Eléctricas en Aire”, Yañez David, IPN, México 1999.
- [25] Jorge Ramírez, Universidad Simón Bolívar, Caracas Venezuela, laboratorio de Alta Tensión, comunicación privada.
- [26] Lopez Tapia, “Influencia de las Condiciones Atmosféricas sobre las Trayectorias de Descargas Eléctricas ”, tesis de maestría, IPN México 1999.
- [27] Allibone T. E., “High Voltage DC Breakdown”, Proc. Int. Conf. On Phen. in Ionized Gases, Swanswn UK (1987) p 240.
- [28] Operating Instructions for one–600 kv, 10 mA dc Test Set, FERRANTI LTD, 1968.
-

-
- [29] Dr. Primo Alberto Calva Chavarría, comunicación privada
- [30] Khalifa M., “High Voltage Engineering”, Marcel Dekker, 1990.
- [31] Allibone T. E. and Saunderson J. C., “The Influence of Corona Formation on the Sparkover of Rod–Gaps Stressed with DC Voltage up to 1 Million”, ISHVE, Milan paper 53.02, 1979.
- [32] Espino F., “Caracterización de Descargas Corona en Corriente Directa”, tesis de maestría IPN, México D. F. 1998.
- [33] Peschke E., “Effect of Humidity on Breakdown and Flashover Behavior at High DC Voltages in Air”, ETZ Archiv, 90(1), 1969, pp 7–13.
- [34] Isa H., Sonoi Y. and Hayashi M., “Breakdown Process of a Rod–to–Plane Gap in Atmospheric Air under dc Voltage Stress”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26 No. 2, pp 291–299, April 1991.
- [35] Suzuki T., Miyake K. and Hara T., “Breakdown Process in Rod–to–Plane Gaps with DC Voltages”, IEEE Transactions on industry applications, Vol. IA–21, No. 1, pp 26 – 34, January/February 1985.
- [36] Climate Prediction Center, NOAA. <http://lwf.ncdc.noaa.gov>

APÉNDICE A

Gráficas para obtener la humedad absoluta, los exponentes m y w y el factor de corrección por tensión aplicada

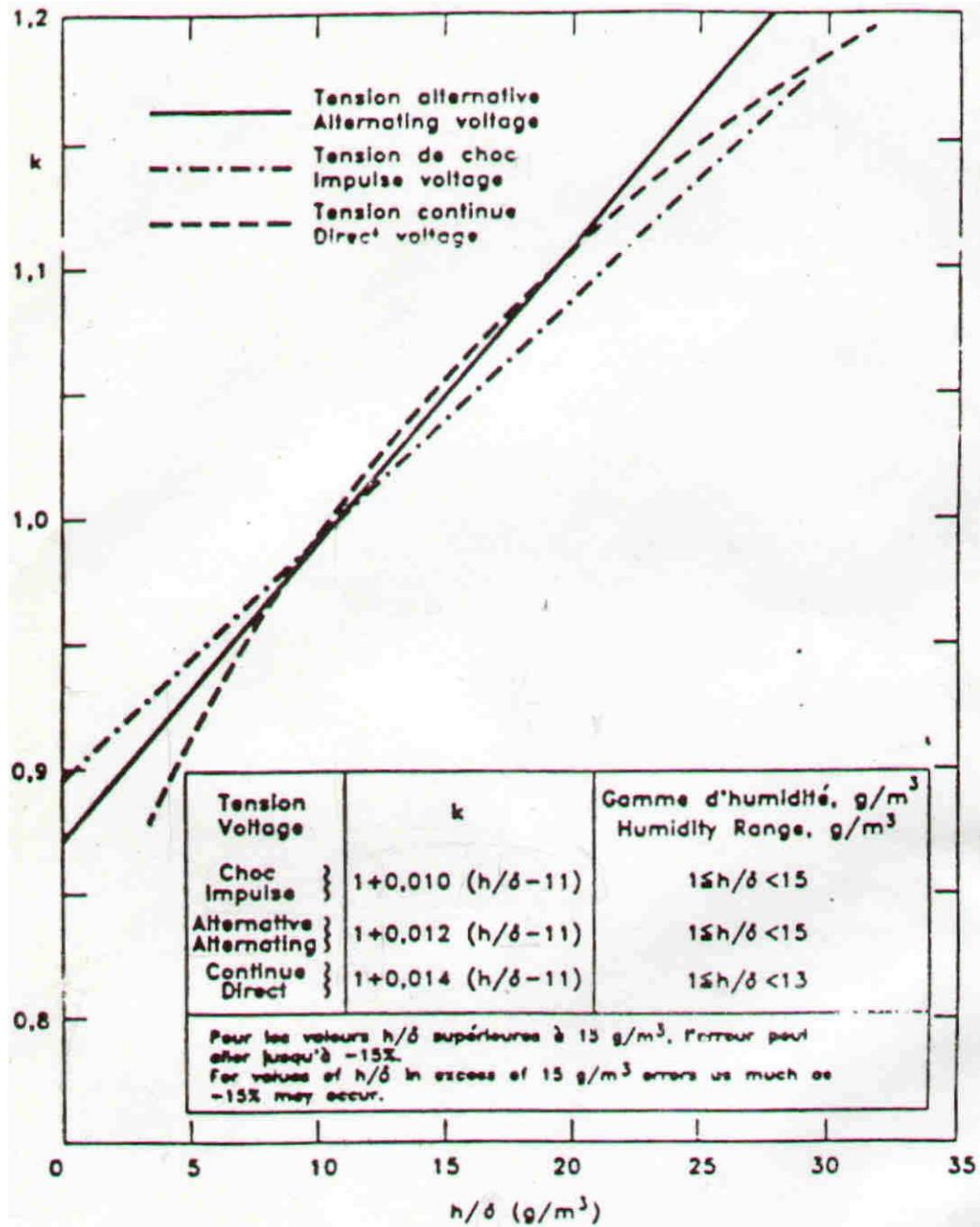


Figura A [tomada de la referencia 1]. Gráfica para determinar el factor k dependiendo del tipo de tensión aplicada.

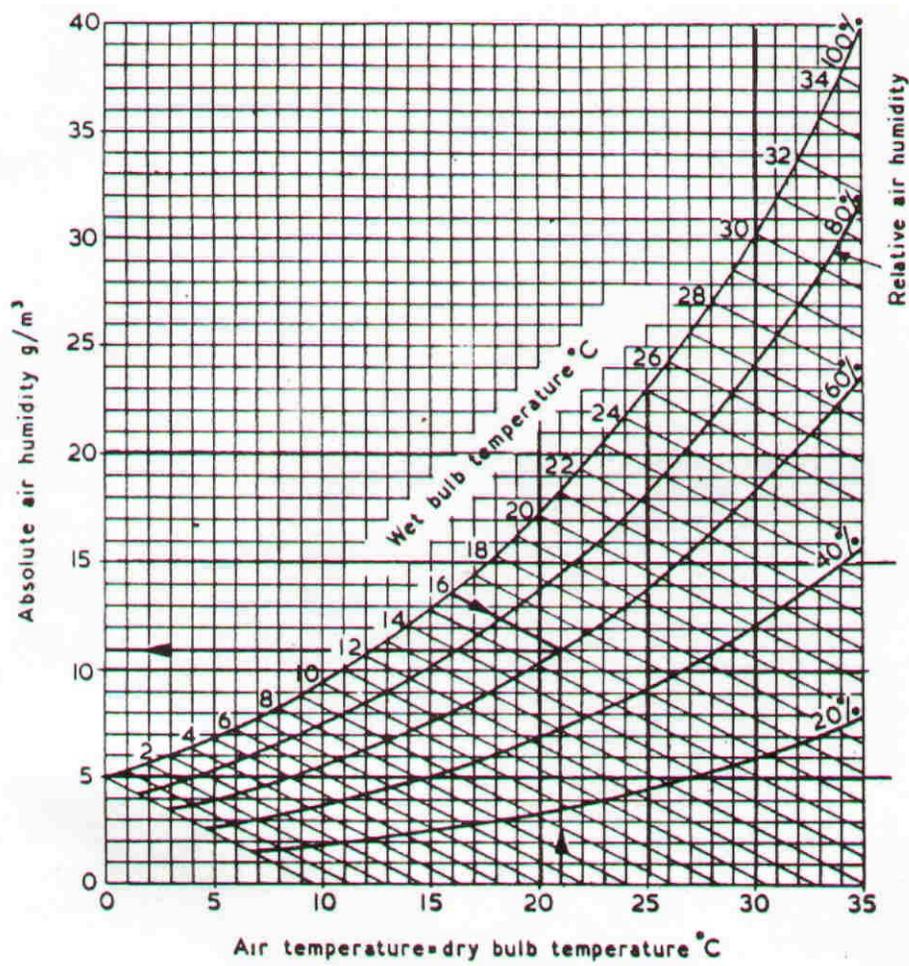


Fig. 18. Absolute and relative humid')
from dry and wet bulb temperatures

Figura B[tomada de la British Standards Institution gr 9, "Guide on high-voltage testing techniques" No. 923, 1972]. Curvas para determinar la humedad absoluta a partir de la humedad relativa y de la temperatura

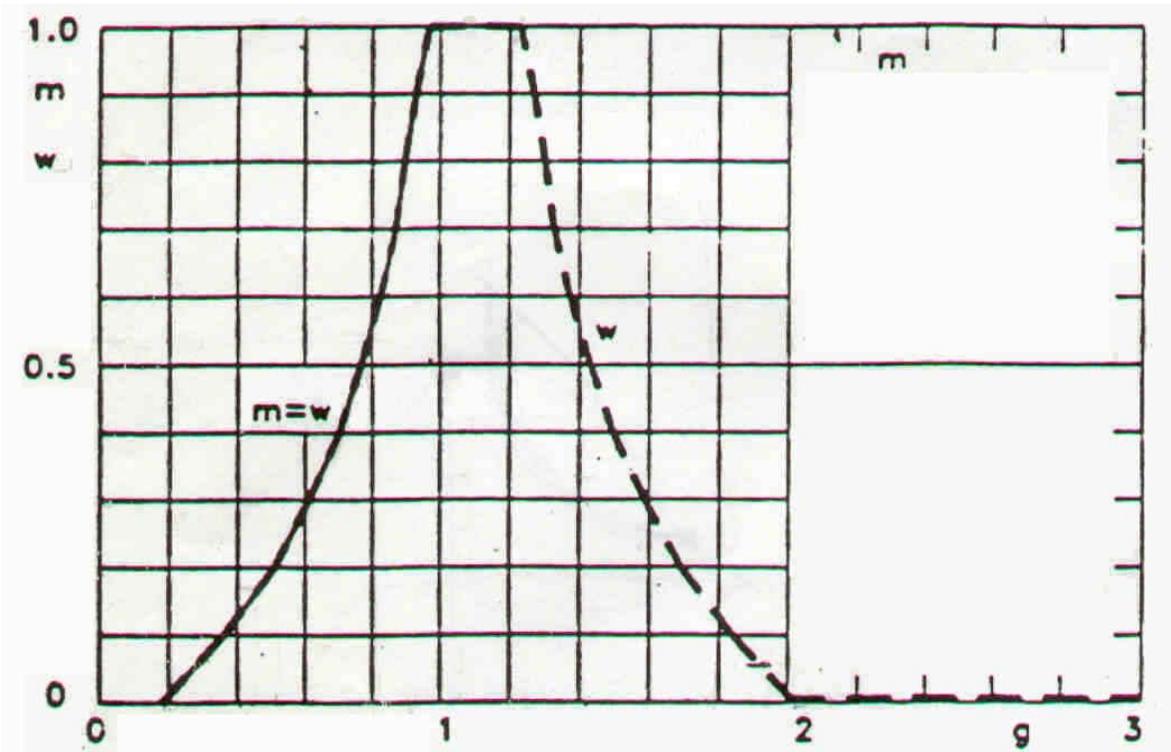
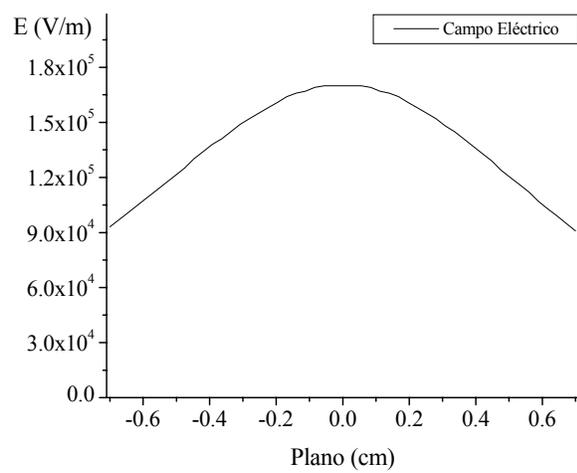
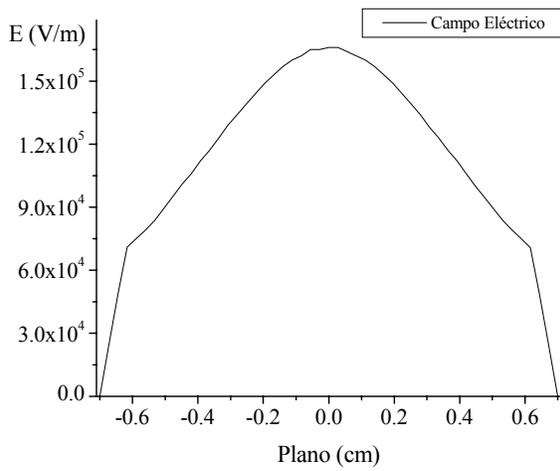
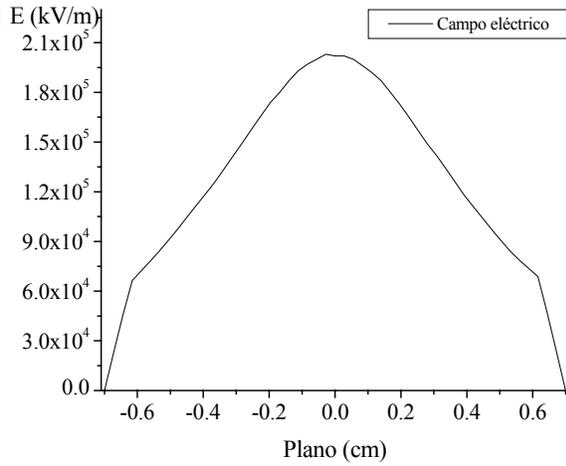
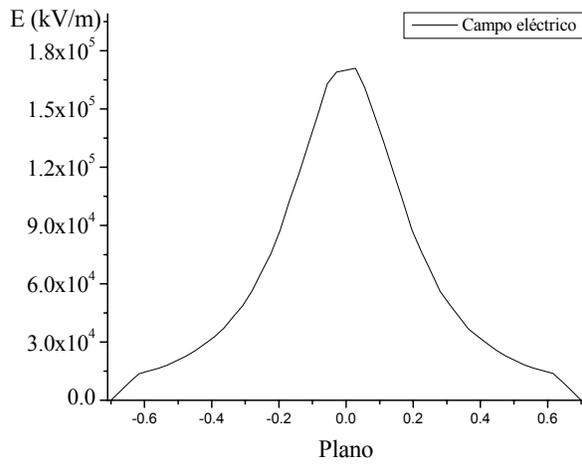


Figura C (Tomada de referencia 1). Gráfica para obtener los exponentes m y w en función del parámetro adimensional g .

APÉNDICE B

Simulación del Campo Eléctrico en los Bordes del Plano



Distribución del campo eléctrico utilizando el paquete computacional ANSYS. El punto sobre el eje horizontal, 0.0 indica el centro del plano; las coordenadas negativas sobre el mismo eje, indican la distancia a la izquierda del plano al centro del mismo.