

Comportamiento de la impedancia de aterrizamiento de una víctima humana impactada por un rayo

Behaviour of a human victim grounding impedance while being stricken by a lightning flash

ÓSCAR DÍAZ

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica. Candidato a Doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Uppsala, Suecia. Docente del proyecto curricular de Tecnología en Electricidad, Facultad Tecnológica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: ojdiazc@unal.edu.co

FRANCISCO SANTAMARÍA

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica. Candidato a Doctor en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador Grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia (EMCUN). Correo electrónico: fsantamariap@unal.edu.co

ALEXANDER ALARCÓN

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica. Investigador Grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia (EMCUN). Correo electrónico: jalarconv@unal.edu.co

FRANCISCO ROMÁN

Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería Eléctrica. Ph.D. y Licenciado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Uppsala, Suecia. Director del Grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia (EMCUN). Docente Titular del proyecto curricular en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: fjromanc@unal.edu.co

Clasificación del artículo: investigación (Conciencias)

Fecha de recepción: 25 de abril de 2008

Fecha de aceptación: 4 de agosto de 2008

Palabras clave: Modelo eléctrico del cuerpo humano, accidentes con rayos, impulsos de tensión tipo rayo, impedancia de tierra.

Key words: Electrical human body model, lightning accident, lightning-like voltage impulse, grounding impedance.

RESUMEN

En 1994 se reportó un accidente debido a un impacto de rayo, en el cual una joven futbolista fue alcanzada por una descarga directa. Este accidente fue analizado y se validó la hipótesis de que un rayo de multiplicidad uno puede tener varios caminos de corriente hacia tierra a través del cuerpo de la víctima. Sin embargo, durante las simulaciones del circuito eléctrico equivalente, la impedancia de la tierra se consideró como una resistencia constante, lo que significaría un comportamiento proporcional entre la tensión y la corriente para corriente continua o de impulso. En realidad, este comportamiento lineal se modifica por la presencia de una capacidad y una inductancia presente en el circuito eléctrico del aterrizamiento de la víctima.

Posteriormente, se modeló la impedancia de aterrizamiento de un zapato ubicado sobre un suelo no homogéneo cuando se le aplican impulsos de tensión tipo rayo. La impedancia de aterrizamiento se calculó por diferentes métodos a partir de los resultados experimentales.

La información obtenida fue analizada y se incluyó una impedancia distinta en el circuito eléctrico del cuerpo humano simulado en EMTP/ATP. Finalmente, se estableció que los resultados medidos y los calculados presentan una buena concordancia.

ABSTRACT

A lightning accident was reported in 1994, in which a young soccer player was injured by a lightning discharge. This accident was studied and the hypothesis of multiple current paths to ground for a human victim being struck by a lightning flash of multiplicity one was probed.

Nevertheless, during the equivalent electrical circuit simulation, the grounding impedance was considered as a single constant resistor, which in fact would suggest a proportional behavior between a voltage and current for DC and impulse cases. Actually this proportional behavior is modified by a capacitance and an inductance present in the grounding equivalent electrical circuit.

We present the results obtained after modeling the grounding impedance of a shoe posed on a non-homogeneous soil subjected to lightning-like voltage impulses. This grounding impedance was calculated from different experimental tests. Finally, the data obtained was analyzed and a modification of the previous modified human body circuit was included in a EMTP/ATP simulation. A good agreement between the measured and calculated results was obtained.

* * *

1. Introducción

El 29 de julio de 1994 se presentó un accidente de rayo en la localidad de Gälve, Suecia. La víctima fue una mujer de 16 años de edad y 1,7 m de estatura que se encontraba jugando fútbol en un campo abierto. Al momento del accidente no estaba lloviendo ni se habían escuchado truenos. Sin embargo, de acuerdo con el Sistema de Detección de Rayos de Suecia (LLP system) fueron registrados 192 eventos en la zona, dentro de los cuales se registró un rayo de polaridad negativa, 16 kA de corriente pico y mul-

tiplicidad uno, que debido a su posición y momento de ocurrencia era el que mayor probabilidad tenía de haber impactado a la víctima.

La figura 1 muestra los caminos de corriente hacia tierra en el lugar donde se encontraba la víctima al momento de ser impactada. Las flechas en la figura muestran los daños por quemadura en el terreno, debido a la corriente de rayo, dos cerca del pie derecho y el otro junto al izquierdo. Las líneas punteadas muestran las trayectorias de la corriente.

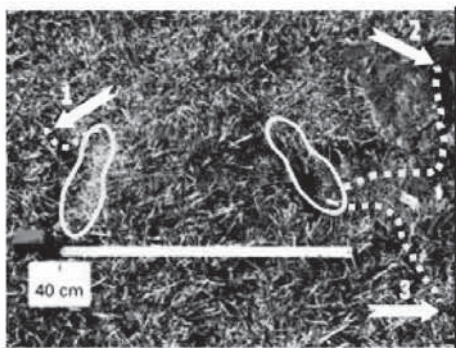


Figura 1. Fotografía del lugar en el que se encontraba la víctima al momento de ser impactada por un rayo

Note las trayectorias de la corriente (líneas punteadas) y los lugares por donde entró a tierra (flechas).

A partir de la observación de las características del accidente se planteó la hipótesis: *una corriente de rayo de multiplicidad uno que impacta una víctima humana de pie sobre un terreno común, puede fluir a través de varios caminos hacia tierra* [1-4].

2. Modelo eléctrico del cuerpo humano

Para validar dicha hipótesis, se empleó un modelo eléctrico del cuerpo humano similar al propuesto por Andrews [5] y se adicionó un elemento eléctrico para modelar los zapatos, que corresponde a las ramas formadas por el resistor R5, el condensador C3 y un interruptor controlado por tensión, como se muestra en la figura 2. Primero se trabajó con el modelo bajo condiciones de baja humedad (modelo 1) en el cual las resistencias superficiales del cuerpo R3 y R4 tenían valores de 300 y 200 Ω , respectivamente. Posteriormente, se trabajó bajo condiciones de mayor humedad, como las presentes en caso de lluvia, teniendo valores de 20 Ω para R3 y R4. Los valores de los elementos utilizados en el modelo de la figura 2 se presentan en la tabla 1.

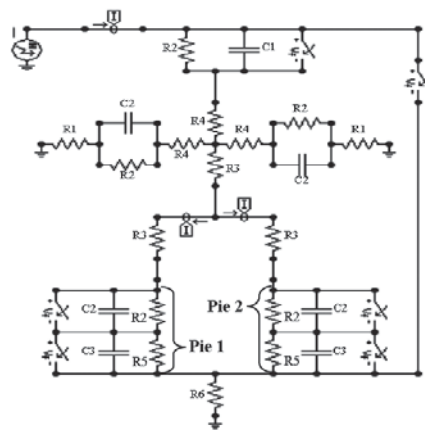


Figura 2. Circuito eléctrico del cuerpo humano propuesto por Andrews [5] y usado en [1-4]. C3 y R5 representan la impedancia del zapato, mientras que R6 es la impedancia de aterrizamiento de los zapatos. En el modelo 1, R3 = 300 Ω y R4 = 200 Ω y en el modelo 2, R3 = R4=20 Ω

Elemento	Modelo 1	Modelo 2
R1	1 G Ω	1 G Ω
R2	10 k Ω	10 k Ω
R3	300 Ω	20 Ω
R4	200 Ω	20 Ω
R5	10 M Ω	10 M Ω
R6	230 Ω	230 Ω
C1	10 μ F	10 μ F
C2	0.25 μ F	0.25 μ F
C3	100 pF	100 pF

Tabla 1. Parámetros electrónicos para los Modelos 1 y 2.

A partir de dicho modelo se realizaron simulaciones en EMTP/ATP, empleando una fuente de corriente tipo de rayo 8/20 μ s y valor pico de 16 kA. La disrupción en la suela de los zapatos se representó por dos interruptores controlados por tensión, fijando sus valores de cierre en 40 kV para el pie 1 y en 70 kV para el pie 2. De estas simulaciones se concluyó que era posible obtener disrupción en ambos pies a pesar de que la tensión disruptiva del pie 2 fuera mayor. Cuando el pie 1 alcanza su tensión disruptiva, parte de la corriente fluye a tierra produciendo una caída de tensión adicional en el pie 2. De esta manera se pueden producir varios caminos de corriente a tierra, debido a la impedancia del suelo. En la

figura 3 se presentan resultados de las simulaciones realizadas con el modelo de la figura. 2.

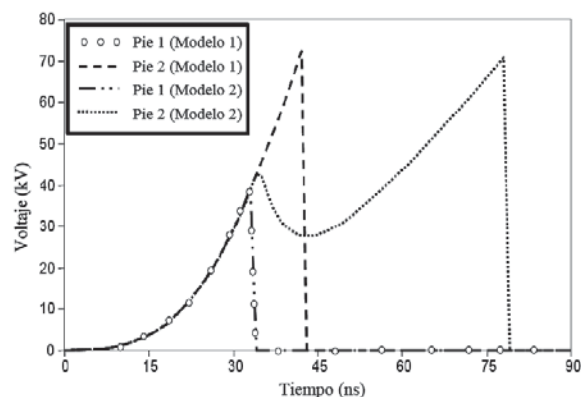


Figura 3. Tensión entre los pies y tierra para los modelos 1 y 2 presentados en la figura 1

Note la tensión disruptiva de 40 kV, 34 ns para el pie 1 en ambos modelos. La ruptura se presenta en el pie 2 en un tiempo diferente, dependiendo del valor de la resistencia de aterrizamiento

Como resultado de estas simulaciones se observó que el modelo del zapato influye significativamente en el comportamiento de la corriente de rayo a través del cuerpo humano.

3. Pruebas de laboratorio

Para validar los resultados obtenidos mediante las simulaciones, se realizaron dos pruebas diferentes, aplicando impulsos de corriente tipo rayo 8/20 μ s con un valor pico de corriente de 16 kA [3].



Figura 4. Electrodo en forma de suela de zapato.

Nótese cómo se aterriza este electrodo a través de spark-gaps.

La primera prueba consistió en utilizar un electrodo metálico en forma de suela, ubicado sobre un suelo no homogéneo aterrizado a través de cuatro espacios interelectrodicos (*spark-gaps*), calibrados a diferentes tensiones disruptivas, como se muestra en la figura 4. En la segunda prueba, se utilizaron zapatos reales ubicados sobre suelo no homogéneo y, nuevamente, se aplicó un impulso de corriente de 16 kA. En la figura 5 se observan dos de las cinco perforaciones dejadas en el zapato por la corriente en su camino hacia tierra.

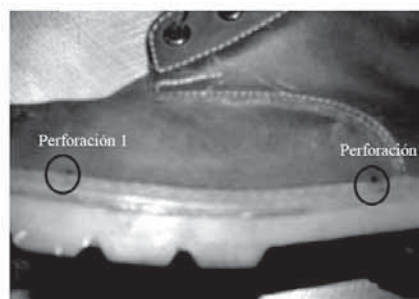


Figura 5. Zapato usado en las pruebas.

Observe en los círculos dos de las perforaciones dejadas por la corriente en su camino hacia tierra

En la figura 6 se observa la forma de onda de la tensión registrada entre el zapato y la tierra. Se observan tres discontinuidades, debidas a la trayectoria de la corriente por diferentes lugares del zapato. La primera ruptura se produjo a los 15 ns, la segunda a los 50 ns y la tercera a los 85 ns. Como resultado de ambas pruebas se observó que la corriente tomaba diferentes caminos hacia tierra, lo que corrobora la hipótesis propuesta inicialmente.

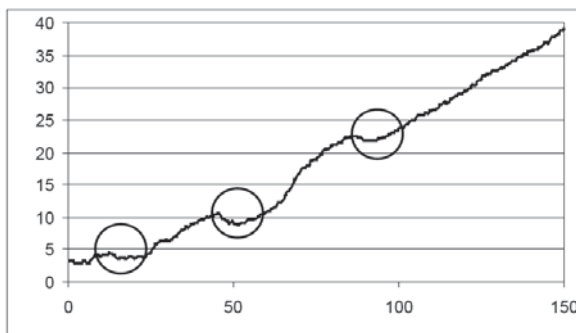


Figura 6. Discontinuidades en la forma de onda debida a las perforaciones en el zapato de la figura 5.

4. Determinación de la impedancia de aterrizamiento del electrodo en forma de suela de zapato

En los resultados mencionados arriba se trabajó con un modelo del aterrizamiento de la víctima puramente resistivo, lo cual es una buena aproximación, pero no es completamente válido especialmente en frecuencias altas. Por tal razón se realizaron algunos experimentos que permitieron obtener un modelo más completo de la impedancia de aterrizamiento del zapato, para ser incluido en el modelo eléctrico del cuerpo humano de la figura 2. Para estas pruebas se utilizaron impulsos de tensión tipo rayo y se registraron tensión y corriente en dos modelos diferentes de zapato. En el primero (montaje experimental 1) se utilizó un electrodo metálico en forma de suela de zapato para medir la impedancia de aterrizamiento y en el segundo (montaje experimental 2) se utilizó un zapato real para mostrar cómo la corriente circula por varios caminos hacia la tierra.

4.1 Montaje experimental 1

Ha sido establecido por varios autores [6-13] que la impedancia de aterrizamiento tiene un comportamiento complejo y que no debe ser representada por una única resistencia. Entonces, para determinar la impedancia de aterrizamiento del zapato, se aplicaron impulsos de tensión tipo rayo a un electrodo en

forma de suela de zapato. El montaje experimental se presenta en la figura 7.

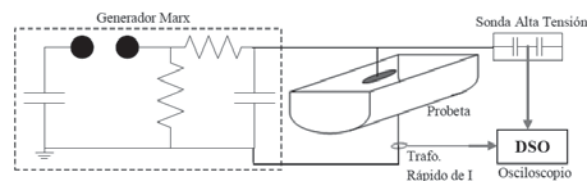


Figura 7. Montaje experimental usado para determinar la impedancia de aterrizamiento.

Nótese que la salida del generador Marx está conectada directamente al electrodo en forma de suela de zapato y la corriente total se mide después de la probeta de pruebas.

Se aplicaron impulsos de tensión no estándar a la muestra de suelo, donde se midieron tensión y corriente sobre la probeta de pruebas. El generador tipo Marx de impulsos de tensión se conectó al electrodo en forma de suela de zapato a través de un fleje de baja inductancia. El valor pico del impulso de tensión se incrementó en pasos de 5 kV hasta 40 kV, para un total de siete pruebas, realizando la medición de tensión una sonda de alta tensión Tektronix® P6015A con un ancho de banda de 75 MHz. La medición de corriente se realizó con un transformador rápido de corriente Bergoz® con un ancho de banda de 200 MHz. Ambas señales se registraron con un osciloscopio digital Tektronix® TDS 2022 con un ancho de banda de 200 MHz. Los cables de señal se encontraban debidamente blindados y el osciloscopio era alimentado por una UPS dentro de una cabina apantallada de medición.

En la figura 8 se observa la ubicación del electrodo sobre la tierra bajo prueba.



Figura 8. Probeta de pruebas y el electrodo en forma de suela de zapato utilizados para determinar la impedancia de aterrizamiento.

Las características del montaje fueron:

- La probeta aterrizada usada en las pruebas era un cilindro metálico cortado a la mitad con una longitud de 0,85 m y un radio de 0,29 m, relleno de una muestra de suelo no homogéneo.
- El electrodo de alta tensión donde se aplicaba el impulso de tensión era un electrodo hecho de lámina de aluminio en forma de suela de zapato.
- El material no homogéneo utilizado como suelo fue tomado de un estrato superficial de suelo fértil común, compuesto principalmente de granos de diferente tamaño de silicio, arcilla, rocas y hierba, entre otros. Se escogió este material dado que es el terreno más probable donde estaría una persona en el caso de que fuera impactada por un rayo bajo las condiciones del accidente analizado inicialmente. Este material fue parcialmente compactado soltando una pesa de 5 kg desde una altura de 0,3 m sobre la probeta de pruebas.
- Durante todas las pruebas, el contenido de humedad de la muestra de suelo utilizado se mantuvo en un 20%.

Como limitaciones para este montaje experimental, se puede mencionar que el modelo de impedancia

de aterrizamiento obtenido es válido sólo para el material de suelo y electrodo utilizados en este trabajo y para impulsos de tensión tipo rayo 1,2/30 μ s. Para las pruebas realizadas la máxima corriente pico medida fue de 10 A, así que no se observaron fenómenos de ionización dentro de la muestra de material de suelo utilizada.

Las señales de tensión y corriente obtenidas en una de las pruebas realizadas (prueba 7) se muestran en la figura 9. Ambas señales presentan un comportamiento similar al inicio, sugiriendo una etapa inicial resistiva. Sin embargo, al final la relación resistiva entre tensión y corriente tiende a variar.

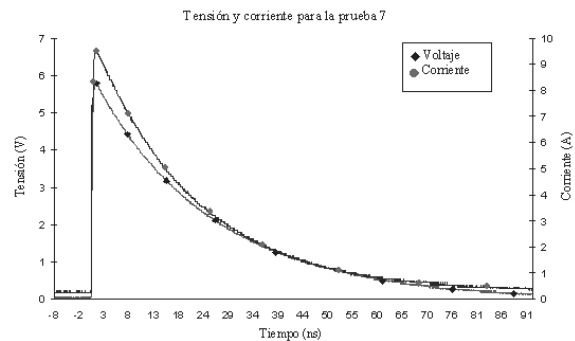


Figura 9. Señales de tensión y corriente en función del tiempo para la prueba 7.

4.2 Función de transferencia

Para los registros de corriente y tensión tomados, la resolución vertical en bits no permitió un análisis directo en frecuencia. Este problema se resolvió suavizando las señales registradas y usando una función disponible en el Toolbox de Curve Fitting de Matlab®.

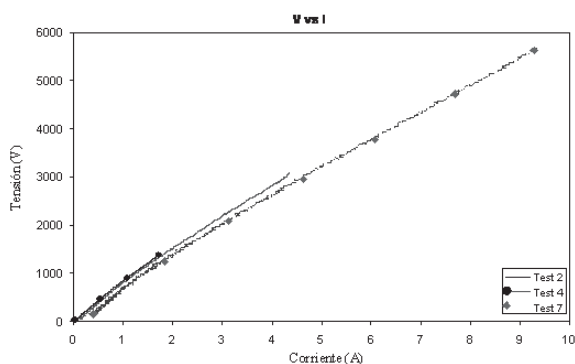


Figura 10. Tensión medida en función de corriente para tres pruebas diferentes.

En la figura 10 se puede observar que la relación tensión-corriente para la prueba 7 tiende a mostrar una relación cuadrática. Utilizando las señales de tensión y corriente previamente suavizadas de las siete pruebas realizadas, se calculó la impedancia equivalente en función de la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier.

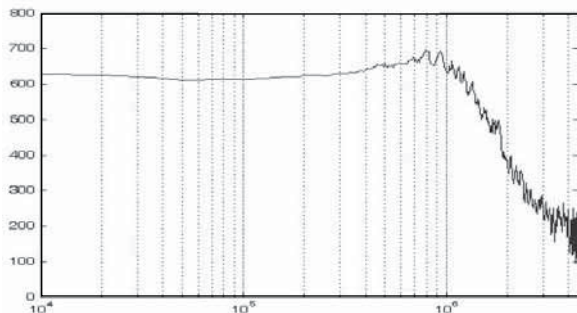


Figura 11. de impedancia en función de frecuencia para la prueba 7.

Nótese la frecuencia de resonancia cerca de 1MHz.

En la figura 11 se muestra la impedancia en función de la frecuencia para la prueba 7. Este análisis se limitó a 4MHz, ya que la mayor parte de contenido espectral de las señales de tensión tipo rayo empleadas en el experimento se encuentra por debajo de esta frecuencia.

4.3 Modelo eléctrico del aterrizamiento

Una forma posible de representar el modelo eléctrico de una impedancia de aterrizamiento es utilizar un circuito paralelo de una resistencia y un condensador, de manera tal que se puedan tener corrientes de conducción y desplazamiento. El tipo de modelo se presenta en la figura 12.

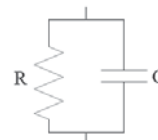


Figura 12. Modelo eléctrico del aterrizamiento del electrodo sobre la muestra de suelo

La inductancia del fleje que se utilizó como conector entre el generador de impulsos y la muestra de suelo se puede calcular con (1).

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{2l}{b+t}\right) + \frac{1}{2} + 0.22 \frac{b+t}{l} \right) \quad (1)$$

Donde: l es la longitud del fleje, b es el ancho y t es el espesor

$$\begin{aligned} \mu &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} & l &= 0.7 \text{ m} \\ b &= 0.07 \text{ m} & t &= 0.7 \text{ mm} \end{aligned}$$

De manera que el valor de esta inductancia sería:
 $L = 250 \text{ nH}$

El circuito eléctrico completo que puede reproducir los principales elementos de este montaje y su respuesta en frecuencia se muestran en la figura 13.

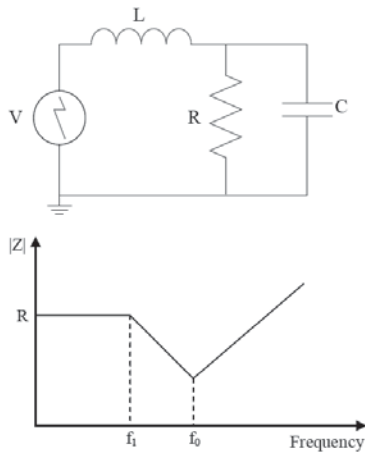


Figura 13. Circuito eléctrico completo del montaje experimental y su respuesta en frecuencia. L representa el fleje de baja inductancia que conecta el generador de impulsos y la muestra de suelo. R y C representan la muestra de suelo

De la respuesta de frecuencia y del circuito equivalente se pueden obtener las frecuencias de resonancia (2) y (3).

$$f_1 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2) \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

El comportamiento que se presenta en la figura 13 es similar al de la figura 11 para bajas frecuencias. Si se parte de esta premisa, se pueden calcular los valores de R y C en la figura 13 comparándolos con los valores de frecuencia en los que se presentan cambios de pendiente en la gráfica de impedancia en función de frecuencia en la figura 11. Por ejemplo, para la prueba 7, $f_1 = 830$ kHz, y reemplazando (2) en (3) se obtiene que:

$$R = 650 \, \Omega \quad C = 260 \, \text{pF}$$

La segunda frecuencia de resonancia $f_0 = 20$ MHz no fue observada claramente durante nuestros experimentos (ver figura 11), dado que el espectro de frecuencia del impulso de tensión tipo rayo aplicado tiene la mayor parte de su contenido por debajo de 1 MHz. Este mismo procedimiento se siguió para

la obtención de R y C para las demás pruebas. Esta información se presenta en la tabla 2.

Prueba	Frecuencia [MHz]	R [Ω]	C [pF]
1	1,50	825	128,6
2	1,00	750	212,2
3	1,50	750	141,5
4	1,00	750	212,2
5	1,00	680	234,1
6	0,95	690	242,8
7	0,93	650	263,3
Promedio		728	205

Tabla 2. Parametros R y C para la muestra de suelo en diferentes pruebas

4.4 Simulación numérica en COMSOL

Se realizó una simulación numérica en el módulo de electrostática general del programa COMSOL®, el cual funciona aplicando el método de los elementos finitos. Este módulo provee una buena aproximación de materiales conductores y dieléctricos similar al caso tratado en el presente trabajo. Esta simulación consistió en aplicar una excitación de impulso de tensión tipo rayo (4) –que sigue la forma de onda de una fuente de impulso tipo Heildler [14]– al electrodo en forma de suela de zapado y observar cuál era la corriente total sobre el electrodo de tierra, es decir, la parte metálica externa de la probeta de pruebas.

$$v(t) = \frac{Amp \cdot \left(\frac{t}{\tau_R}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_R}\right)^n} \cdot e^{-t/\tau_F} \quad (4)$$

Donde:

Amp= Factor multiplicativo de la función. No re...presenta el valor pico del impulso.

τ_R = Tiempo de ascenso. Intervalo de tiempo entre $t=0$ y el tiempo para el valor máximo de la función.

τ_F = Tiempo de cola. Intervalo de tiempo entre $t=0$ y el tiempo para el cual la amplitud de la función ha decrecido hasta un 37% del valor pico de la función.

n = Factor que influencia la razón de incremento de la función. Aumentando n se incrementa la pendiente máxima.

Para la simulación presentada en este trabajo se utilizaron los siguientes valores:

$$Amp = 6800 \text{ V} \quad \tau_R = 1 \mu\text{s}$$

$$n = 2 \quad \tau_F = 40 \mu\text{s}$$

En la figura 14 se presentan los resultados obtenidos para la simulación descrita anteriormente para el tiempo del valor máximo de tensión. La muestra de suelo usado en la probeta de pruebas se modeló como una conductividad constante de $\sigma = 0,003\text{S/m}$ y una permitividad relativa de $\epsilon_R = 42$.

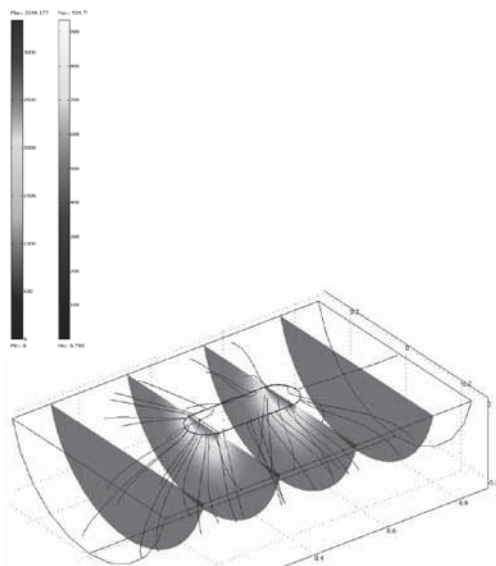


Figura 14. Resultados de la simulación obtenidos para el tiempo en el cual la tensión tiene su valor máximo.

La barra de la izquierda de la figura corresponde a la distribución del potencial eléctrico en cuatro secciones del volumen. La barra de la derecha corresponde a la distribución de la densidad de corriente en la muestra de material representado en líneas sólidas.

Los valores constantes de σ y ϵ_R fueron asumidos teniendo en cuenta varios estudios realizados en un suelo común a baja frecuencia en condiciones de similares a las tenidas durante la experimentación de este trabajo [15-17].

En la figura 15 se presenta la corriente obtenida en todo el electrodo de tierra cuando se aplica un impulso de tensión tipo rayo. Esta corriente se obtuvo integrando la densidad de corriente sobre la frontera externa de la probeta de pruebas. La tensión máxima fue de 5.790 V y el valor pico de corriente fue de 9,5 A.

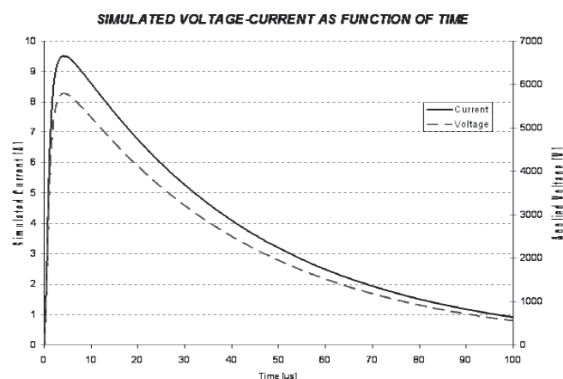


Figura 15. Corriente simulada cuando se aplicó un impulso de tensión tipo rayo.

De los resultados obtenidos en la simulación, se puede concluir que los valores seleccionados para conductividad y permitividad están en concordancia con los valores reales de la muestra de suelo utilizada en el experimento.

5. Prueba experimental con un zapato real

5.1 Montaje experimental 2

Para realizar una medición simultánea de tensión y corriente al momento de la disrupción entre el zapato y la muestra de suelo, a diferencia del procedimiento usado en [3], se modificó el electrodo de alta tensión del montaje experimental 1, rellenando un zapato real con esferas metálicas de diámetro 3 mm, como se muestra en las figuras 16 y 17. Para este montaje experimental se utilizó el mismo sistema de medida, generador de impulsos, muestra de suelo y probeta de pruebas descritos en el montaje experimental 1.

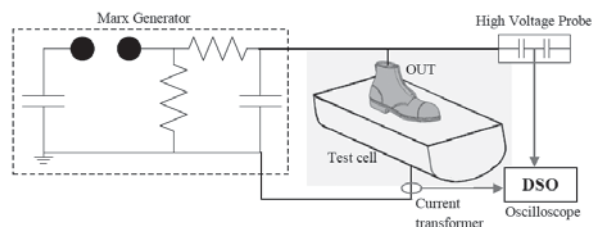


Figura 16. Esquema del montaje experimental 2, en el que se aplicó un impulso de tensión tipo rayo a un zapato real.

La tensión máxima de carga del generador Marx fue de 60 kV. En la figura 17 se presenta una imagen del montaje experimental utilizado.



Figura 17. Montaje experimental 2 para la aplicación de impulsos tipo rayo a un zapato real.

Con el fin de poder ilustrar el proceso de disrupción en la suela del zapato al ser sometido a impulsos de tensión tipo rayo, se tomaron varios videos con una cámara de video común. En la figura 18 se presenta una secuencia de dos eventos disruptivos diferentes, el primero corresponde a las dos fotografías superiores y el segundo a las dos fotografías inferiores.

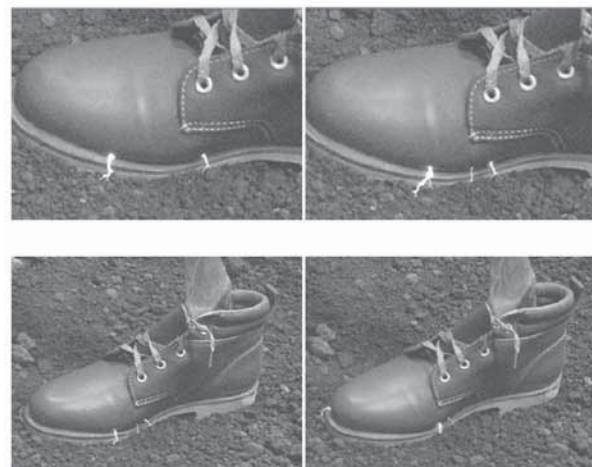


Figura 18. Secuencia de imágenes para dos eventos disruptivos distintos.

Nótese que en todas las imágenes se tiene más de un camino de corriente.

A partir de la figura 18, se puede corroborar que la corriente toma más de un camino a tierra. Después de alcanzar la tierra a través de un primer camino, se incrementa el potencial eléctrico en diferentes puntos de la suela del zapato a razón de la caída de tensión en el suelo hasta el punto en que se alcanza la tensión disruptiva y se producen nuevos caminos de corriente. Este proceso puede ocurrir varias veces durante la aplicación de un impulso de tensión sencillo. De esta manera, el número de caminos de corriente a tierra desde la suela del zapato dependerá de la impedancia de aterrizamiento, la tensión disruptiva en diferentes puntos de la suela y de la forma de onda.

Además, se observó que la corriente de un impulso posterior no tomaba exclusivamente el camino de corriente que había tomado el impulso anterior. Después de varias pruebas, se observaron muchos caminos de corriente diferentes. Las señales de tensión y corriente registradas para la prueba 7 se presentan en la figura 19. Para esta prueba, se observaron dos caminos de corriente diferentes.

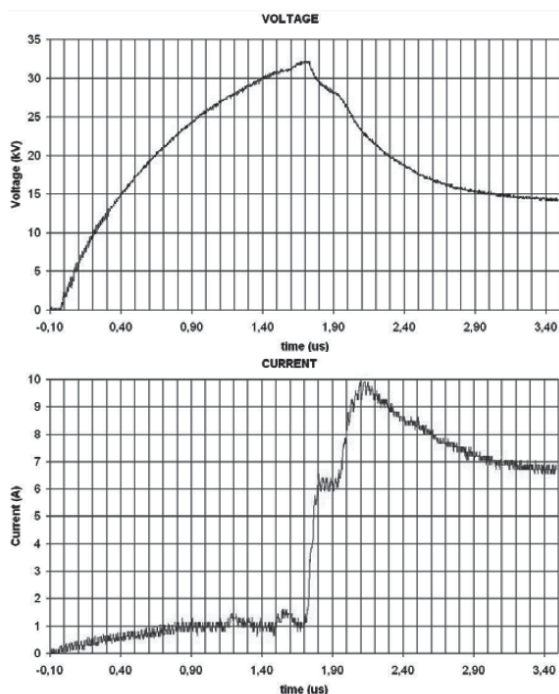


Figura 19. Señales de tensión y corriente registradas para la prueba 7 en las que se observaron dos caminos de corriente.

En la figura 19 se puede ver que para una tensión aplicada de 32 kV a 1.7 μ s, ocurre la primera disrupción y la señal de corriente alcanza rápidamente el valor de 6 A. Después de 20 ns, se tiene una segunda disrupción y la corriente llega hasta un valor de 10 A en 2,1 μ s. Para este segundo evento, la tensión decae siguiendo su carácter exponencial. Las señales presentadas en la figura 19 corroboran nuestra hipótesis de que es posible tener varios caminos a tierra a través del cuerpo de una víctima alcanzada por una corriente de rayo. Cabe recalcar que la im-

pedancia de aterrizamiento es un factor primordial en este estudio, ya que la variación de la caída de tensión sobre ella define la presencia simultánea de varios caminos de corriente a tierra.

6. Simulaciones con emtp/atp

La impedancia de aterrizamiento, que se encontró después del análisis anterior, fue incluida en el modelo eléctrico del cuerpo humano. El modelo circuital analizado incluye solamente la suela del zapato y la impedancia de aterrizamiento y omite las diferentes partes del cuerpo, como se muestra en la figura 20. Los elementos R1 y C1 representan la suela del zapato y los elementos R2 y C2 representan la impedancia de aterrizamiento en el punto de inyección de corriente a tierra. La tensión disruptiva para la suela, simulada por los interruptores controlados por tensión S1 y S2, se fijó en 32 kV y 40 kV. Se utilizó una fuente tipo Heidler como excitación de tensión tipo impulso con valor máximo de 40 kV y tiempos de ascenso y cola de 1,2/30 μ s.

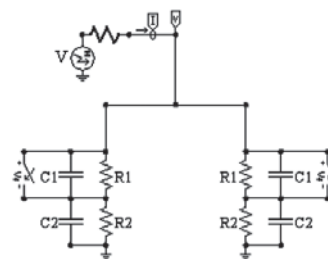


Figura 20. Modelo de la suela del zapato e impedancia de aterrizamiento analizado en EMTP/ATP. Para este caso específico, se simularon dos caminos de corriente diferentes.

En la figura 21 se muestran las señales de tensión y corriente obtenidas de la simulación.

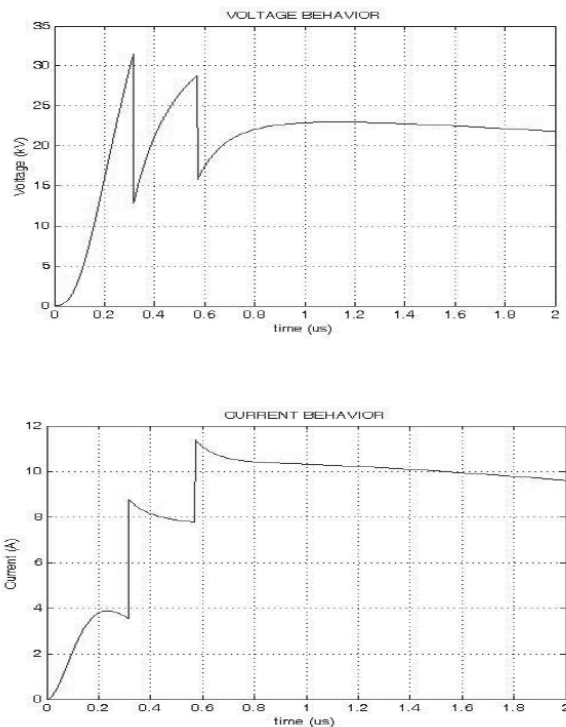


Figura 20. Modelo de la suela del zapato e impedancia de aterrizamiento analizado en EMTP/ATP. Para este caso específico, se simularon dos caminos de corriente diferentes.

Nótese los cambios en las señales en el momento de cierre de los interruptores.

Al comparar las señales presentadas en las figuras 19 y 21, se puede observar que las señales de tensión y corriente medidas tienen un comportamiento similar a las simuladas. Las señales de corriente tienen un inicio lento en su ascenso, pero cuando ocurre la disrupción en la suela hay un cambio de magnitud grande en un tiempo corto, es decir, hay un cambio de pendiente di/dt grande. Esta corriente se recupera sólo cuando la disrupción en la suela se extingue y la tensión sobre ésta se recupera a un valor menor siguiendo la tensión aplicada por la fuente.

7. Conclusiones

Un modelo circuital de segundo orden como el formado por el paralelo de una resistencia y un condensador es el que mejor representa la impedancia de aterrizamiento de la suela de un zapato en el modelo eléctrico del cuerpo humano sometido a impulso de tensión. Estos valores de R y C se determinaron mediante un montaje experimental analizado en este trabajo.

Mediante simulaciones y registros fotográficos, fue posible demostrar que la corriente de rayo se puede dividir en varios caminos para llegar a tierra cuando se aplica un impulso de tensión tipo rayo a un zapato apoyado sobre una muestra de terreno común.

Se observó que el valor de la resistencia es el parámetro más influyente en la impedancia de aterrizamiento. De igual manera, el uso de impulsos de tensión es más conveniente para este tipo de trabajo experimental, dado que la impedancia del objeto de prueba utilizado no afecta considerablemente el circuito eléctrico del generador. Se recomienda para trabajos futuros, un análisis más detallado de los cambios rápidos de corriente en el suelo.

A partir de los resultados experimentales y teóricos obtenidos, es claro la suela de material dieléctrico de un zapato no es una protección suficiente para una persona víctima de un impacto de rayo directo, dado que la impedancia del suelo donde está apoyada es capaz de elevar el potencial de referencia y así superar la rigidez dieléctrica de la suela, lo que permite la circulación de corrientes a través del cuerpo de la víctima.

La única manera efectiva de protegerse en caso de proximidad de tormentas eléctricas es refugiándose en lugares cerrados seguros o tomando posiciones seguras en lugares abiertos. Sin embargo, este tipo de medidas no es conocido por el común de la gente, por lo que una medida que ayude a reducir los accidentes relacionados con rayos sería la difusión masiva de información al respecto de protección de personal en caso de descargas eléctricas atmosféricas.

8. Agradecimientos

Los autores agradecen el uso de los espacios de la Universidad Nacional de Colombia para el desarro-

llo de la parte experimental y el soporte económico dado por el proyecto de investigación Cattleya.

Referencias bibliográficas

- [1] F. Román, A. Alarcón & F. Santamaría, “Analysis of a Lightning Accident in Gavle, Sweden”, *Proc. of the 8th International Symposium on Lightning Protection*, Sao Pablo, Brazil, Nov. 2005.
- [2] F. Santamaría, A. Alarcón, & F. Román, “Analysis of a lightning accident considering a modified human body model”, *Proc. of the 28th International Conference on Lightning Protection*, Kanazawa, Japan, pp. 1249-1253, Sept. 2006.
- [3] F. Román, F. Santamaría, & A. Alarcón, “Modeling and Analysis of a Lightning Accident in Gavle, Sweden”, *Journal of Lightning Research*, Vol. 1, pp. 51-59, Jan. 2007.
- [4] F. Santamaría, “Study of lightning in Bogotá. A comparison with other countries – Annex 1: Modeling and analysis of the human body under lightning impact”, M.Sc tesis, Universidad Nacional de Colombia, febrero de 2007.
- [5] C. Andrews, “Interaction Electrical aspects of lightning strike to humans, The Lightning Flash”, ed. V. Cooray, pp. 549-564, *IEE Power and Energy Series 34*, The Institution of Electrical Engineers, London, 2003.
- [6] J.H. Montaña, “Puestas a Tierra. Variación de los parámetros eléctricos del terreno con la frecuencia y software para el cálculo de potenciales transitorios”, Ph.D. tesis, Universidad Nacional de Colombia, abril de 2006.
- [7] Mohamad Nor, Haddad, A. and H. Griffiths, “Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 353-361, Jan. 2006.
- [8] Zequing Song, Raghuvver, M.R. & Jingliang He, “Influence of the nature of impulse current propagation in soils on transient impedance characteristics” *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 739-742, 2000.
- [9] Chowdhuri, P. “Impulse impedance test on laboratory model ground electrodes”, *Proc. of IEEE Transmission and distribution*, Vol. 150, No. 4, pp. 427-433, Jul. 2003.
- [10] M. Nor, AHaddad & H. Griffiths, “Determination of threshold electric field E_c of soil under high impulse currents”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 3, pp. 2108-2113, Jul. 2005.
- [11] M. Nor, “Review: Soil electrical characteristics under high impulse currents”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 48, No. 4, pp. 826-829, Nov. 2006.
- [12] Portela, C. “Measurement and modelling of soil electromagnetic behavior”, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 2, pp. 1004-1009, Aug. 1999.

- [13] Yaqing Liu, “Transient response of grounding systems caused by lightning: Modeling and experiments” Ph.D. Thesis, Uppsala University, 2004.
- [14] F. Heidler, *Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung, Hochschule der Bundeswehr München*, pp. 63–66, 1995.
- [15] F. Heidler, “Low-Frequency electrical properties,” *Journal of Geophysics*, vol. 50, no. 12, pp. 2492–2503, Dec. 1985.
- [16] B. Anggoro, N.I. Sinisuka & P.M. Pakpahan, “Resistivity and Dielectric Constant Characteristic of Soil if are treated by Water, Salt and Carbon”, *8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*, 2006.
- [17] R.J. Edwards, “Measurement of Soil Resistivity & Calculation of Earth Electrode Resistance”, 1998. Available in <http://www.smeter.net/grounds/earthres.php>