



UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS

“MAESTRÍA EN SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL”

TITULO:

**ANÁLISIS DE EFECTOS FISIOLÓGICOS EN EL
SER HUMANO DEBIDO A DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS QUE IMPACTAN LÍNEAS
AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE
MAGISTER EN SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL**

AUTOR: Ing. Adrian Eugenio Ñauta Ñauta

C.I. 0104234612

DIRECTOR: Ing. John Armando Morales García. Ph.D

C.I. 0103705943

CUENCA, ECUADOR

2018



RESUMEN

En Ecuador el suministro de energía eléctrica llega a los diferentes domicilios, industrias entre otros a través de un sistema eléctrico de potencia, desde su generación. Por tal razón, es claro que los seres humanos pueden estar expuestos a diferentes efectos de la corriente eléctrica. Ecuador por su geografía se encuentra ubicado en una zona isoceraunico de nivel alto, esto describe que las descargas atmosféricas son elevadas e impredecible, ocasionando daños al sistema y sobre todo afectar la salud de las personas.

En este trabajo de tesis se presenta un análisis detallado basado en un proceso de simulación tanto del modelo del cuerpo humano, el alimentador de distribución y las descargas atmosféricas directas e indirectas, esto con el fin de obtener el valor de la intensidad de corriente que podría ingresar en el cuerpo humano. Posteriormente mediante un análisis estocástico se pudo clasificar los efectos fisiológicos acorde al nivel de corriente.

Respecto al proceso de simulación, se consideró 21 valores de intensidad de corriente por descargas atmosféricas, 6 distancias a la cual impacta la descarga atmosférica; y adicionalmente 4 distancias transversales correspondientes a rayos indirectos fueron simulados, donde se realizó un análisis de más de 3000 casos, respectivamente.

Resultados de este trabajo de tesis, muestran que los diferentes casos de descargas atmosféricas pueden ocasionar efectos fisiológicos sobre el cuerpo humano, que van desde contracciones musculares, alteración en la presión arterial, dificultad respiratoria, quemaduras graves, fibrilaciones y paradas cardiacas con alta probabilidad de muerte.

Palabras claves: seguridad eléctrica, rayo, efecto fisiológico.



ABSTRACT

Electric energy in Ecuador is widely available for houses, industries, among others using advance power electronics systems. It is clear that human beings can be exposed to different effects of electric current. Because of its geographical conditions, Ecuador is located in a high and unpredictable isokeraunic zone which describes atmospheric discharges with high voltages and currents. That incurs in damage upon power distribution systems and health of people.

In this thesis, a detailed analysis is presented based on a simulation process of the human body model, the distribution feeder and the direct and indirect atmospheric discharges in order to obtain values of current intensity that could enter the human body. Subsequently, by means of a stochastic analysis, it was possible to classify the physiological effects according to the current level.

Regarding the simulation process, 21 values of current intensity due to atmospheric discharges were considered, 6 distances to which the atmospheric discharge impacts; and additionally 4 transversal distances corresponding to indirect rays were simulated, where an analysis of more than 3000 cases was performed, respectively.

Results of this thesis work, show that different cases of atmospheric discharges can cause physiological effects on the human body, ranging from muscle contractions, alteration in blood pressure, respiratory distress, severe burns, fibrillations and cardiac arrest with high probability of death.

Keywords: electric safe; lightning stroke, physiologic effect.



TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
TABLA DE CONTENIDOS	4
LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	9
.....	11
AGRADECIMIENTOS	12
DEDICATORIA.....	13
GLOSARIO.....	14
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	15
CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 SEGURIDAD ELÉCTRICA	19
2.1.1 Efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.	19
2.2 MODELO DEL CUERPO HUMANO	21
2.1.1 Factores que intervienen en los accidentes eléctricos.	22
2.1.2 Los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.	23
2.2 ESTRUCTURA ELÉCTRICA DEL SISTEMA ATMOSFERA-TIERRA.....	24
2.3 REDES DE DISTRIBUCIÓN AÉREAS.....	26
2.4 ESCENARIOS DE ESTUDIO	27
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODO	29
3.1 SIMULACIÓN DEL ALIMENTADOR DE DISTRIBUCIÓN Y EL CUERPO HUMANO.....	30
3.2 Descripción de las variables de contorno.....	34
3.2.1 Variables dependientes y variables independientes.....	34
3.2.2 Dominios de las variables independientes de la descarga atmosférica directa.....	36
3.2.3 Dominios de las variables independientes de la descarga atmosférica indirecta.	37



3.3 Procedimiento de obtención de resultados de simulación.....	38
3.4 Descripción del Análisis Estocástico.....	39
3.4.1 Procedimiento de análisis estocástico.....	39
3.4.2 Modelo de Regresión Lineal múltiple.....	39
CAPITULO IV: RESULTADOS	41
4.1 ANÁLISIS ESTOCÁSTICO	42
4.1.1 Análisis estocástico de la descarga atmosférica directa.....	42
4.1.1.1 Regresión multivariable de la descarga atmosférica directa:	44
4.1.1.1.1 Variables de la descarga atmosférica directa.....	44
4.1.1.2 Modelo de regresión lineal de la descarga atmosférica directa.....	1
4.1.2 ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE LAS DESCARGA ATMOSFÉRICA INDIRECTA 2	
4.1.2.1 Regresión multivariable de la descarga atmosférica indirecta:	3
4.1.2.1.1 Variables de la descarga atmosférica indirecta.....	3
4.1.2.2 Modelo de regresión lineal de la descarga atmosférica indirecta.....	6
4.1.3 ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE LAS DESCARGA ATMOSFÉRICA INDIRECTA BASADO EN LA CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA CORRIENTE ALTERNA.....	7
4.1.3.1 Regresión multivariable de la descarga atmosférica indirecta, basado en EFCA. ...	11
4.1.3.1.1 Variables de la descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.	12
4.1.3.2 Modelo de regresión lineal de la descarga atmosférica indirecta.....	14
4.1.3.3 Error estándar de estimación Múltiple:	15
4.1.4 Clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna por estratos.....	16
4.1.4.1 Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por el Brazo Izquierdo y los efectos fisiológicos propagados en las otras extremidades.....	16
4.1.4.2 Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por el Brazo Derecho y los efectos fisiológicos propagados en las otras extremidades.....	19



4.1.4.3 Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por la Cabeza y los efectos fisiológicos propagados en las otras extremidades 22

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 30



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores que intervienen en los accidentes eléctricos. (Cortés Díaz, 2012)	22
Tabla 2. Efectos fisiológicos de la corriente alterna (50/60 Hz).	24
Tabla 3. Variables que intervienen en la descarga atmosférica directa.	34
Tabla 4. Variables que intervienen en la descarga atmosférica indirecta.	34
Tabla 5. Registro de mediciones.	35
Tabla 6. Clasificación por efectos fisiológicos.	36
Tabla 7. Formato de registro de resultados de simulación de la descarga atmosférica directa.	37
Tabla 8. Formato de registro de resultados de simulación de la descarga atmosférica indirecta.	37
Tabla 10. Correlaciones - descarga atmosférica directa	45
Tabla 11. Resumen del modelo - descarga atmosférica directa	45
Tabla 12. ANOVA - descarga atmosférica directa	46
Tabla 13. Coeficientes - descarga atmosférica directa	46
Tabla 14. Correlaciones - descarga atmosférica indirecta	4
Tabla 15. Resumen del modelo - descarga atmosférica indirecta	5
Tabla 16. ANOVA - descarga atmosférica indirecta	5
Tabla 17. Coeficientes - descarga atmosférica indirecta	6
Tabla 18. Tabulación cruzada ICDA*EFCA	8
Tabla 19. Tabulación cruzada L1*EFCA	10
Tabla 20. Tabulación cruzada L2*EFCA.	11
Tabla 21. Resumen del modelo - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.	13
Tabla 22. ANOVA - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.	13
Tabla 23. Coeficientes - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.	14
Tabla 24. Tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_BD.	16
Tabla 25. Tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PI	17
Tabla 26. Tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PD.	18
Tabla 27. Tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_BI.	19



Tabla 28. Tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PI.....	20
Tabla 29. Tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PD	21
Tabla 30. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BI	22
Tabla 31. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BD	23
Tabla 32. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PI	24
Tabla 33. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PD	25



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación del cuerpo humano.....	23
Figura 2. Descarga atmosférica - Línea aérea de distribución – Hombre.....	27
Figura 3. Descarga atmosférica Indirecta – Suelo - Línea aérea de distribución – Hombre.....	28
Figura 4. Esquema de simulación.	38
Figura 5. Grafica de dispersión L1 - ICIH	43
Figura 6. Grafica de dispersión ICDA - ICIH.....	43
Figura 7. Grafica de dispersión EFCA - ICIH.....	43
Figura 8. Histograma variable dependiente ICIH - descarga atmosférica directa.....	1
Figura 9. Grafica de dispersión L1 - ICIH	2
Figura 10. Grafica de dispersión L2 - ICIH	2
Figura 11. Grafica de dispersión ICDA - ICIH.....	2
Figura 12. Grafica de dispersión EFCA - ICIH.....	2
Figura 13. Histograma variable dependiente ICIH - descarga atmosférica indirecta..	6
Figura 14. Grafica de barra de tabulación cruzada ICDA*EFCA	9
Figura 15. Grafica de barra de tabulación cruzada L1*EFCA.....	10
Figura 16. Grafica de barra de tabulación cruzada L2*EFCA.....	11
Figura 17. Histograma variable dependiente ICIH - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.....	14
Figura 18. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_BD	17
Figura 19. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PI	18
Figura 20. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PD	19
Figura 21. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_BI	20
Figura 22. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PI	21
Figura 23. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PD	22
Figura 24. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BI	23
Figura 25. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BD.....	24
Figura 26. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PI	25
Figura 27. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PD.....	25



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Adrian Eugenio Ñauta Ñauta en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“ANÁLISIS DE EFECTOS FISIOLÓGICOS EN EL SER HUMANO DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS QUE IMPACTAN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 de marzo de 2018

Adrian Eugenio Ñauta Ñauta

C.I: 0104234612



Cláusula de Propiedad Intelectual

Adrian Eugenio Ñauta Ñauta, autor/a del trabajo de titulación **“ANÁLISIS DE EFECTOS FISIOLÓGICOS EN EL SER HUMANO DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS QUE IMPACTAN LÍNEAS AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 20 de marzo de 2018

Adrian Eugenio Ñauta Ñauta

C.I: 0104234612



AGRADECIMIENTOS

Al Ing. John Morales Gracia. Ph.D, por la dirección en el presente trabajo y por compartir sus conocimientos, a la Universidad Politécnica Salesiana por brindarme el espacio para fortalecerme como profesional en la Seguridad e Higiene Industrial.

Adrian Eugenio Ñauta Ñauta



DEDICATORIA

A mis padres que inculcaron el conocimiento como estructura fundamental del ser humano, a mi amada esposa Ma. Augusta, por impulsarme y comprender el esfuerzo que realizamos como familia, a mis tres hermosos hijos Camilo, Gabriel y Julián, quienes que con una sonrisa motivan el espíritu del saber.

Adrian Eugenio Ñauta Ñauta



GLOSARIO

Nivel Isoceraunico: se utiliza para ubicar el cable de guarda en las líneas.

EFCA: clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna.

L1: la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el ser humano (liniero) en metros.

L2: la distancia transversal entre la descarga atmosférica que cae sobre la tierra y la línea de distribución en metros.

ICDA: la intensidad de corriente de la descarga atmosférica en Amperios.

EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.

ICIH: intensidad de corriente que ingresa al ser humano.

EFCA_BI: efecto fisiológico de la corriente alterna en el brazo izquierdo.

EFCA_BD: efecto fisiológico de la corriente alterna en el brazo derecho.

EFCA_PI: efecto fisiológico de la corriente alterna en la pierna izquierda.

EFCA_PD: efecto fisiológico de la corriente alterna en la pierna derecha



CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En Ecuador el suministro de energía eléctrica llega a los diferentes domicilios, industrias entre otros a través de un sistema eléctrico de potencia, desde su generación. Un ejemplo de esto es la hidroeléctrica de Paute, pasando por las diferentes subestaciones eléctricas, líneas de transmisión y finalmente las líneas aéreas de distribución que transportan la energía hasta los diferentes usuarios.

Es claro que los seres humanos pueden estar expuestos a diferentes efectos de la corriente eléctrica, tanto las personas que están dentro de su domicilio como los trabajadores del sector eléctrico llamados generalmente linieros.

Por otra parte, debido a su comportamiento no predecible y al ser un fenómeno natural externo, las descargas atmosféricas o rayos, son la principal causa en afectar los niveles de voltaje y corriente en la red eléctrica y por lo tanto en los niveles que un usuario podría estar expuesto y también los trabajadores del sector eléctrico que usualmente hacen mantenimiento en la red eléctrica.

En el momento que una descarga atmosférica impacte sobre una línea aérea de distribución, o en las cercanías de un domicilio, esta podría producir elevadas tensiones y corrientes que ingresan al domicilio y podrían afectar la salud de las personas. Por otra parte, los linieros generalmente están realizando continuamente trabajos sobre las líneas aéreas eléctricas de distribución. Sin embargo, conocer el momento en que una descarga atmosférica impacte sobre una línea eléctrica es muy difícil, por lo tanto, los trabajadores podrían estar expuestos a diferentes riesgos por la corriente eléctrica que inducirá la caída de un rayo sobre la línea eléctrica o sus cercanías.

Basado en lo anteriormente dicho, las corrientes y voltajes generados por un rayo son los principales riesgos al cual está expuesto tanto un usuario como un trabajador del sector eléctrico. En este sentido, cuando se producen descargas atmosféricas sobre una persona, cerca de ella, sobre las líneas aéreas de distribución, es posible que el individuo experimente una circulación de corriente sobre su cuerpo produciendo



efectos fisiológicos acorde al valor de la corriente recibida y la forma en la que ésta ingresa a su cuerpo, es decir si la corriente ingresa por su cabeza o extremidades superiores o inferiores, respectivamente.

En este sentido, el presente estudio pretende realizar un análisis de los efectos fisiológicos que puede producir una descarga atmosférica al caer sobre la línea eléctrica de distribución y su efecto sobre las personas. Por lo tanto, la corriente se conduce por la línea hasta llegar al trabajador y las guardas de protección, las mismas que si no producen el efecto deseado y la descarga atmosférica supera las barreras de protección llegando a entrar en contacto con el trabajador, producirían trastornos fisiológicos que dependiendo el nivel de corriente pueden ser desde efectos mínimos como cosquilleos hasta efectos serios como la muerte. Para realizar este análisis es necesario considerar todos los posibles escenarios de descargas atmosféricas, con sus diferentes valores. Otro aspecto importante que analizar es la forma en que la corriente ingresa y sale por el trabajador permitiendo categorizar los efectos fisiológicos.

Para el desarrollo de este estudio, se iniciará fundamentando teóricamente el modelo del cuerpo humano, el comportamiento de los rayos sobre las líneas aéreas eléctricas y sus efectos. Posteriormente, con los diferentes modelos estructurados, se realizarán diferentes simulaciones considerando un amplio rango de variables y escenarios. Finalmente, con estos valores obtenidos, se realizará un análisis estocástico con el fin de identificar los efectos fisiológicos que podrían ocurrir sobre las personas.

Los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano están directamente relacionados con su magnitud, siendo los efectos más comunes cosquilleos, contracción muscular, pérdida del conocimiento, fibrilación ventricular, asfixia y quemaduras. Es decir, mientras mayor sea la magnitud de la corriente, sus efectos pueden ser mayores. Por lo tanto, es imperativo analizar los niveles de corriente que puede estar expuesta una persona a diferentes fenómenos eléctricos. En este sentido, las descargas atmosféricas son consideradas como el principal fenómeno en producir los más altos niveles de corrientes. (Salvatierra, Dominguez, & Morales, 2015)

Cuando una persona está expuesto a los efectos de una descarga atmosférica indirecta, es decir cuando ésta impacta sobre el suelo e induce niveles de sobrevoltaje



sobre las líneas eléctricas aéreas, estas podrían influir sobre las personas. El cuerpo humano no está preparado para soportar niveles altos de tensión, que dependiendo de las características de la descarga atmosférica esta podría producir. Por otra parte, el cuerpo aumenta repentinamente en un grado su temperatura y especialmente el cerebro se ve fuertemente afectado a ese cambio llegando a producir una parada cardiaca y casi siempre también una respiratoria debido al shock producido por los niveles altos de corriente y voltaje.

Por otra parte, es necesario analizar qué ocurre cuando la descarga eléctrica no cae sobre el trabajador, por ejemplo, pero si sobre las líneas aéreas de distribución eléctrica o sobre el suelo a una distancia predeterminada; por lo tanto, la corriente se va a inducir sobre el trabajador, llegando en menor intensidad por su distancia o los implementos de seguridad que estén involucrados en el sistema. En este sentido, es necesario conocer y analizar los diferentes niveles de corriente que pueden circular sobre una persona y definir los efectos fisiológicos que éstos puedan ocasionar sobre ella.

Adicionalmente, la frecuencia de ocurrencia de descargas atmosféricas sobre determinada zona se basa en el nivel isoceraunico. En Ecuador, este nivel es alto, donde el impacto de rayos sobre líneas eléctricas aéreas y sus entornos es muy elevado. Es así, que se han dado situaciones donde los rayos impactan sobre las líneas eléctricas e incluso sobre las personas. Estadísticas muestran que un rayo impacta sobre una persona cada 45 días.(El Telégrafo, 2016)

El presente trabajo de tesis contribuirá a identificar qué efectos fisiológicos pueden producirse sobre las personas, cuando las descargas atmosféricas impactan las líneas aéreas de distribución. Para lo cual se simulará tanto el modelo del cuerpo humano como del fenómeno del rayo, variando su magnitud y la distancia desde el punto de impacto hasta la persona. En este sentido, este trabajo podrá ser considerado como un insumo para las diferentes distribuidoras eléctricas, para organismos de control vinculados a la seguridad e higiene industrial, con el fin de establecer procedimientos de trabajo sobre líneas aéreas de distribución.



CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA



2.1 SEGURIDAD ELÉCTRICA

El uso de la energía eléctrica hoy en día es muy común, está inmersa en casi toda actividad del ser humano, la usamos y muchas veces sin pesar los peligros que eso conlleva.

2.1.1 Efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.

El paso de la corriente eléctrica por el cuerpo humano puede ocasionar lesiones como golpes, caídas y sobre todo la muerte por fibrilación ventricular. Una persona se electriza, cuando la misma pasa a ser parte del circuito eléctrico, distinguiendo puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente. La electrocución se produce cuando la persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo (Gabarda, 1993).

La **fibrilación ventricular** consiste en el movimiento anárquico del corazón, el cual, deja de enviar sangre a los distintos órganos y, aunque esté en movimiento, no sigue su ritmo normal de funcionamiento (Gabarda, 1993; Henao Robledo, 2014).

Por **tetanización** entendemos el movimiento incontrolado de los músculos como consecuencia del paso de la energía eléctrica. Dependiendo del recorrido de la corriente perderemos el control de las manos, brazos, músculos pectorales, etc. (Gabarda, 1993).

La **asfixia** se produce cuando el paso de la corriente afecta al centro nervioso que regula la función respiratoria, ocasionando el paro respiratorio (Gabarda, 1993).

Otros factores fisiopatológicos tales como contracciones musculares, aumento de la presión sanguínea, dificultades de respiración, parada temporal del corazón, etc. pueden producirse sin fibrilación ventricular. Tales efectos no son mortales, son, normalmente, reversibles y, a menudo, producen marcas por el paso de la corriente.



Las quemaduras profundas pueden llegar a ser mortales (Gabarda, 1993; Henao Robledo, 2014).

Se denomina contacto eléctrico al contacto de una persona con cualquier parte en tensión de una instalación o de un sistema eléctrico. La tensión de contacto (VC) es la tensión que hay en el punto de contacto antes de que lo toque el individuo y que, en consecuencia, éste deberá soportar cuando se produzca el contacto. En general se distinguen dos tipos de contactos: directos e indirectos (Villarrubia, 2000)

El contacto directo se origina cuando la persona toca directamente un conductor o una parte activa bajo tensión. En general, cuando una persona entra en contacto directo entre una parte activa bajo tensión y tierra o una masa unida a tierra, la tensión de contacto (VC) adquiere un valor muy próximo a la tensión simple o de fase (Villarrubia, 2000).

Se produce contacto indirecto cuando el individuo entra en contacto con una masa o una carcasa envolvente de un receptor que accidentalmente presenta un fallo de aislamiento (Levy, 2010; Villarrubia, 2000)

Corriente de contacto: corriente que pasa a través del cuerpo humano cuando se le somete a una tensión, también llamada tensión de contacto (Bermúdez Luque, 2012; Villarrubia, 2000)

Corriente de defecto o de falta: corriente que circula por causa de un defecto de aislamiento (Levy, 2010; Villarrubia, 2000)

Choque eléctrico: efecto fisiológico debido al paso de la corriente por el cuerpo (Gibilisco, Sclater, & García Díaz, 1994; Villarrubia, 2000).

Tensión de contacto: diferencia de potencial que durante un defecto puede resultar aplicada entre la mano y el pie de una persona, que toque con la mano una masa o un elemento metálico, normalmente sin tensión. Para determinar este valor se considera que la persona tiene los pies juntos; a un metro de la masa o elemento metálico que toca y que la resistencia del cuerpo entre la mano y el pie es de 2.500Ω (Gibilisco et al., 1994; Villarrubia, 2000).



2.2 MODELO DEL CUERPO HUMANO

La electricidad es la energía más utilizada tanto en la industria como a nivel doméstico, de tal manera que el ser humano esta interactuando constantemente con esta energía y sus sentidos no son capaces de detectarla con facilidad, y cuando lo detectan ya existe el peligro (Bovea Edo, 2011; Cortés Díaz, 2012).

Riesgo eléctrico, se establece como la posibilidad de circulación de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano.

Los factores que intervienen en el riesgo eléctrico:

- El cuerpo humano sea conductor.
- El cuerpo humano pueda formar parte del circuito.
- Exista una diferencia de tensiones entre dos puntos de contacto. (Cortés Díaz, 2012)

Cuando la corriente eléctrica circula por el cuerpo humano, este se comporta como una resistencia (Ley de Ohm), estructurando la ecuación de la siguiente manera:

- I: intensidad de corriente que pasa por el cuerpo humano. (Amperios)
- R: resistencia que opone el cuerpo al paso de la corriente. (Ohmios)
- V: Tensión de contacto existente entre el punto de entrada de la corriente y el de salida. (Voltios)

$$I = \frac{V}{R}$$

(Lara Almazán, 2012)



2.1.1 Factores que intervienen en los accidentes eléctricos.

En la siguiente tabla se describe los factores Técnicos y Humanos que intervienen en accidentes eléctricos:

FACTORES QUE INTERVIENEN EN LOS ACCIDENTES ELÉCTRICOS

FACTORES TÉCNICOS	FACTORES HUMANOS
Intensidad de la corriente que pasa por el cuerpo humano.	Edad.
Tiempo de exposición al riesgo.	Enfermedades.
Trayectoria de la corriente eléctrica por el cuerpo humano.	Sexo.
Naturaleza de la corriente. (alterna/continua)	Estado emocional.
Resistencia eléctrica del cuerpo humano.	Profesión habitual.
Tensión aplicada.	Experiencia, etc.

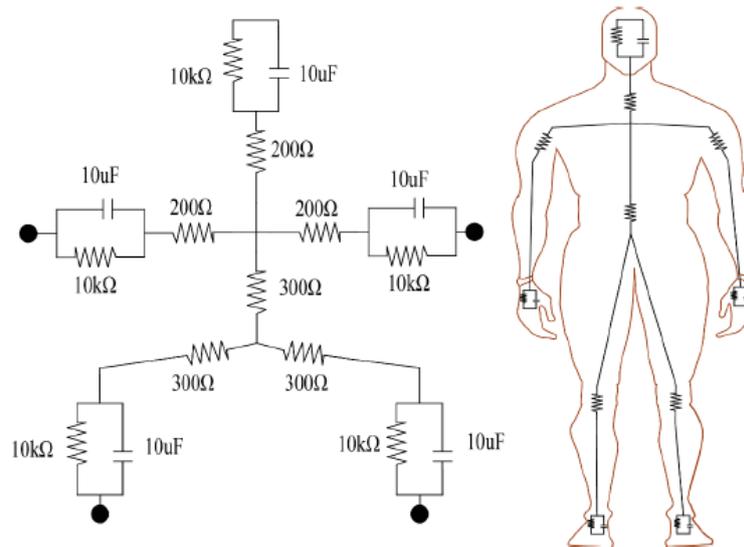
Tabla 1. Factores que intervienen en los accidentes eléctricos. (Cortés Díaz, 2012)

En las diferentes investigaciones en el modelo del cuerpo humano se considera una impedancia equivalente, resistencias que van desde 500Ω a $1 \text{ k}\Omega$, dependiendo de la temperatura, humedad y otras prioridades físicas. El cuerpo humano no es estrictamente resistivo (Salvatierra et al., 2015).

Por tal razón el cuerpo humano actúa como un semi conductor, de ahí que su resistencia varíe con la tensión (ISASTUR, 2010)

El cuerpo humano en concordancia con los componentes eléctricos puede ser asociado de la siguiente manera:

Figura 1. Representación del cuerpo humano.



Fuente: (Salvatierra et al., 2016)

Experimentalmente está demostrado que es la intensidad que atraviesa el cuerpo humano y no la tensión la que puede ocasionar lesiones debido al accidente eléctrico y se distingue (Cortés Díaz, 2012; Henao Robledo, 2014):

Umbral de Percepción: es el valor de la intensidad de la corriente que una persona comienza a recibir (ligero hormigueo), cuando hace contacto con la mano en un conductor, equivalente a 1 mA de corriente alterna.

Intensidad Limite: máxima intensidad de corriente a la que una persona aun es capaz de soltarse del conductor, equivalente a 10 mA de corriente alterna.

2.1.2 Los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.

Los efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano están directamente relacionados con su magnitud, siendo los efectos más comunes cosquilleos, contracción muscular, pérdida del conocimiento, fibrilación ventricular, asfixia y quemaduras (Salvatierra et al., 2015)



Tabla 2. Efectos fisiológicos de la corriente alterna (50/60 Hz).

Efecto	Intensidad	Efectos
1	0-0.5 mA	No se observan sensaciones ni efectos. El umbral de percepción se sitúa en 0.5 mA
2	0.5-10 mA	Calambres y movimientos reflejos musculares. El umbral de no soltar se sitúa en 10 mA
3	10-25 mA	Contracciones musculares. Agarrotamiento de brazos y piernas con dificultad de soltar objetos. Aumento de la presión arterial y dificultades respiratorias.
4	25-40 mA	Fuerte tetanización. Irregularidades cardíacas. Quemaduras. Asfixia a partir de 4 s
5	40-100 mA	Efectos anteriores con mayor intensidad y gravedad. Fibrilación y arritmias cardíacas.
6	~1A	Fibrilación y paro cardíaco. Quemaduras muy graves. Alto riesgo de muerte
7	1-5A	Quemaduras muy graves. Parada cardíaca con elevada probabilidad de muerte

Fuente: (Salvatierra et al., 2015)

La investigación de Biegelmeier y Lee en 1980, proporciona evidencia de que un corazón humano se hace cada vez más susceptible a la fibrilación ventricular, cuando el tiempo de exposición a la corriente se aproxima al período de latido del corazón el peligro es mucho menor si el tiempo de exposición a la corriente está en la región de 0.06-0.3 s (Salvatierra et al., 2015)

2.2 ESTRUCTURA ELÉCTRICA DEL SISTEMA ATMOSFERA-TIERRA.

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) se constituye desde la etapa de generación de energía eléctrica, pasando por la transmisión de energía, hasta llegar al sistema de distribución de energía para finalmente llegar a los diferentes usuarios. El SEP



puede verse muy afectado, especialmente debido a descargas atmosféricas sobre líneas aéreas de distribución. (Físicas & Fernández-montes, 2002)

El rayo es el fenómeno eléctrico externo por excelencia. Normalmente se origina en nubes tormentosas, de gran desarrollo vertical cuyos centros de carga son de una magnitud de decenas de culombios. Para que se produzca una descarga (rayo) es necesario alcanzar altos campos eléctricos (lo que se denomina potencial de ruptura), del orden de varios cientos voltios por centímetro. Una descarga tipo suele transferir a la superficie terrestre unos 20 culombios. Pero además de descargar desde la nube al suelo, una nube tormentosa puede dar lugar a otro tipo de descargas: entre dos puntos dentro del sistema tormentoso, o entre la nube y la ionosfera. Las descargas al suelo suelen transferir carga negativa, si bien también se han observado descargas positivas, en general asociadas a descargas desde el “yunque” de los cumulonimbos. (Físicas & Fernández-montes, 2002)

Describir un rayo puede resultar una misión ardua. Básicamente, el rayo se inicia, una vez superado el potencial de ruptura, con una descarga desde la nube al suelo (desde el centro de carga negativo) de débil luminosidad y, en general, ramificada, cuya velocidad es del orden de 105m/s; avanzando a “pasos” (stepped leader, SL) y que transporta unos 5 C. Cuando el SL está próximo a la superficie, se origina desde ésta una descarga de conexión que da lugar a las descargas principales o de vuelta (return or main stroke, RS). Los RS son corrientes de alta intensidad, 10000 a 20000 A, en general, un SL va seguido de 3 o 4 RS. (Físicas & Fernández-montes, 2002)

De una manera simplificada desde el punto de vista de la ingeniería, cuando se produce un rayo, se puede representar como un interruptor o switch que se cierra y permite el paso de la corriente desde la nube hasta las líneas eléctricas o el suelo. El rayo es un fenómeno perturbador importante del funcionamiento de todas las instalaciones eléctricas y constituye un peligro para las personas. La exigencia de la calidad de los sistemas eléctricos demanda fiabilidad, disponibilidad y continuidad de servicio, así como la presión permanente de minimizar los costes de producción y la utilización de electricidad. (Físicas & Fernández-montes, 2002)



2.3 REDES DE DISTRIBUCIÓN AÉREAS.

Las redes de distribución eléctrica constituyen la parte final del sistema eléctrico de potencia, esta sección enlaza la subestación eléctrica con los diferentes medidores ubicados en los domicilios. En Ecuador la mayoría de las líneas eléctricas son aéreas, es decir están ubicadas usualmente a lo largo de las calles y avenidas. Estas líneas eléctricas están construidas de conductores de aluminio desnudos, que son colocados sobre aisladores instalados en crucetas, en postes de madera o de concreto. Esta infraestructura, permite de una manera fácil y económica, transportar la energía eléctrica hasta los diferentes domicilios. (Castaño, 2004)

Las partes principales de un sistema aéreo de distribución son:

- a) Postes: que pueden ser de madera, concreto o metálicos y sus características de peso, longitud y resistencia a la rotura son determinadas por el tipo de construcción de los circuitos. Son utilizados para sistemas urbanos postes de concreto de 14, 12 y 10 metros con resistencia de rotura de 1050, 750 y 510 kg respectivamente.
- b) Conductores: son utilizados para circuitos primarios el Aluminio y el ACSR desnudos y en calibres 4/0, 2/0, 1/0 y 2 AWG y para circuitos secundarios en cables desnudos o aislados y en los mismos calibres. Estos circuitos son de 3 y 4 hilos con neutro puesto a tierra. Paralelo a estos circuitos van los conductores de alumbrado público.
- c) Crucetas: son utilizadas crucetas de madera inmunizada o de ángulo de hierro galvanizado de 2 metros para 13.2 kV. y 11.4 kV. con diagonales en varilla o de ángulo de hierro (pié de amigo).
- d) Aisladores: Son de tipo ANSI 55.5 para media tensión (espigo y disco) y ANSI 53.3 para baja tensión (carretes).
- e) Herrajes: todos los herrajes utilizados en redes aéreas de baja y mediana tensión son de acero galvanizado. (grapas, varillas de anclaje, tornillos de máquina, collarines, uez, espigos, etc.).
- f) Equipos de seccionamiento: el seccionamiento se efectúa con cortacircuitos y seccionadores monoplares para operar sin carga (100 A - 200 A).

- g) Transformadores y protecciones: se emplean transformadores monofásicos con los siguientes valores de potencia o nominales: 25 - 37.5 - 50 - 75 kVA y transformadores trifásicos de 30 - 45 - 75 -112.5 y 150 kVA protegidos por cortacircuitos, fusible y pararrayos tipo válvula de 12 kV. (Castaño, 2004)

2.4 ESCENARIOS DE ESTUDIO

En este trabajo de tesis, se analizarán dos escenarios de estudio, que se presentan a continuación:

Descarga atmosférica directa: en este caso la descarga atmosférica impacta directamente sobre los conductores aéreos de distribución, y la corriente inducida viaja hasta llegar al cuerpo humano, este análisis se puede realizar variando la distancia desde el punto de impacto del rayo hasta la persona. Figura 2.

Figura 2. Descarga atmosférica - Línea aérea de distribución – Hombre



Fuente: El Autor

Descarga atmosférica indirecta: en este caso la descarga atmosférica impacta sobre el suelo, e induce un voltaje sobre los conductores aéreos de distribución, de igual manera, estas corrientes se propagan hasta llegar al cuerpo humano. Figura 3. Este análisis se puede realizar variando la distancia desde el punto de impacto del rayo

hasta la persona, como además de la distancia desde el punto de impacto del rayo a la línea eléctrica de distribución. Ver Figura 3.

Figura 3. Descarga atmosférica Indirecta – Suelo - Línea aérea de distribución – Hombre.



Fuente: El Autor.



CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODO



3.1 SIMULACIÓN DEL ALIMENTADOR DE DISTRIBUCIÓN Y EL CUERPO HUMANO.

En el momento que una descarga atmosférica cae directamente sobre las líneas aéreas de un alimentador de distribución eléctrica o sobre el suelo, ésta produce ondas viajeras con una magnitud suficiente generada en algún punto de la línea eléctrica, la cual puede causar una falla en los aisladores. En este sentido, las descargas atmosféricas pueden producir una falla llamada Flashover o backflashover si el voltaje producido por el rayo excede la resistencia del aislador. El voltaje y corriente inducido en los conductores de fase de la línea eléctrica viajan a lo largo del alimentador de distribución hasta llegar a los extremos de la línea donde trabajadores del sector eléctrico pueden estar realizando algún trabajo específico. En este contexto, el análisis de descargas atmosféricas tiene una importancia crucial, proveyendo confiabilidad y seguridad a los trabajadores. Por lo tanto, estudios y análisis de descargas atmosféricas y sus efectos sobre los trabajadores deben ser realizados mediante simulación digital. En este trabajo de tesis, tanto un alimentador de distribución eléctrica como el modelo de cuerpo humano son simulados usando el programa Alternative Transients Program ATP.

El alimentador de distribución simulado corresponde a una línea aérea trifásica de 22kV sin hilo de guarda, donde los diferentes elementos simulados se presentan a continuación:

Descarga atmosférica directa: La corriente del rayo es representada mediante una fuente de corriente. Por lo tanto, en el ATP, el rayo es modelado mediante el generador de corriente “Heidler type” (Proceedings, IEEE, & 2003, n.d.). Este modelo es ampliamente usado para representar la corriente del rayo directo, donde la magnitud del rayo puede ser modificada.

Descarga atmosférica indirecta: La descarga eléctrica que impacta en el suelo es simulado mediante la ecuación de Rusck, misma que es recomendada y usada para el análisis de rayos que caen en el piso. Esta ecuación es implementada en el lenguaje MODELS propio del ATP.



Sistema equivalente del alimentador de distribución: La red equivalente es representada mediante una fuente de voltaje ideal “ACSOURCE” (Dommel, 1986) y la impedancia de circuito equivalente es modelada mediante el modelo de línea tipo “PI” (Cabral et al., 2012).

Línea de distribución. El alimentador de distribución es simulado considerando secciones de conductor entre dos consecutivos postes de distribución. La sección de cada línea es simulada en el ATP usando el modelo de parámetros dependientes de la frecuencia “JMARTI” (Group, 1996).

Postes: Los postes de distribución son simulados mediante una combinación en paralelo de una resistencia y un capacitor (Darveniza, Holcombe, & Stillman, 1979) .

Sistema de puesta a tierra: La resistencia de tierra es modelada usando una resistencia fija concentrada.

Aisladores: Los aisladores son simulados mediante interruptores controladores por voltaje disponibles en la librería del ATP capacitor (Darveniza et al., 1979).

Con respecto al cuerpo humano, basado en la Figura 1, esto es claro que el modelo está compuesto de resistencias y capacitancias, mismo que es simulado en el ATP.

Posteriormente, simulados el sistema de distribución y el cuerpo humano, diferentes parámetros del alimentador de distribución, especialmente la magnitud de corriente del rayo y distancia desde el punto de impacto hasta la ubicación del trabajador son simulados. En este sentido para descargas atmosféricas directas (rayos que impactan directamente en la línea eléctrica) la magnitud de corriente del rayo y la distancia son variadas. Luego por cada una de estas combinaciones, el valor de corriente que circula por el brazo izquierdo, derecho, pierna izquierda y derecha de la persona son registradas con el fin de poder hacer un análisis estocástico y compararlas con el valor límite acorde a la tabla número 2. En la tabla 3, se muestra las variables que han sido consideradas para el caso de descargas atmosféricas directas.

Por otra parte, con respecto a descargas indirectas que impactan en el suelo, además de considerar o variar la magnitud de la corriente del rayo, distancia desde el punto de impacto hasta la ubicación del trabajador, también se considera la distancia desde



el punto de impacto hasta la distancia más corta a la línea aérea, tal como se muestra en la Figura 2.

En este sentido, la tabla 4 muestra todas las variables que han sido consideradas para el caso de rayos que impactan en el piso. Las mediciones son registradas de igual manera que el caso de rayo directos, es decir, el valor de corriente son medidas en el brazo izquierdo, derecho, pierna izquierda y derecha, respectivamente.

Todos estos casos de análisis y variables anteriores son registradas y analizadas en tres tipos de casos adicionales, mismos que dependen de qué extremidad está en contacto con la línea aérea. Así, todas las variables anteriores son consideradas cuando, el trabajador toca con el brazo izquierdo la línea aérea, cuando el trabajador toca con el brazo derecho la línea aérea y finalmente cuando el trabajador toca con la cabeza la línea eléctrica.

Considerando las variables de estudio antes mencionada se realizó, un total de 378 y 756 casos para descargas atmosféricas directas e indirectas respectivamente, que se describen a continuación:

Descargas atmosféricas directas:

Para iniciar la simulación, se establece las variables de contorno, distancia $L1=340m$, intensidad de corriente de descarga atmosférica $ICDA = 5Ka$, extremidad por donde ingresa la corriente $EXT=$ brazo izquierdo, esta primera simulación permite obtener 4 valores de corriente, la primera que es el valor de corriente que ingresa al cuerpo humano por la extremidad de contacto ($ICIH_{BI}$) y las otras 3 son las que se distribuyen por el cuerpo humano en el brazo derecho, pierna izquierda y pierna derecha respectivamente ($ICIH_{BD}$, $ICIH_{PI}$ y $ICIH_{PD}$). Posteriormente se procede a variar la Intensidad de corriente de descarga atmosférica ($ICDA$) 21 veces (5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260 kA), se repite este procedimiento pero ahora variando la extremidad de ingreso, siendo estas 3 (brazo izquierdo, brazo derecho y cabeza), obteniendo un total de 63 valores de corriente que ingresan al cuerpo humano, finalmente se varia la distancia $L1$ (340, 420, 500, 580, 660 y 1000m) por 6 ocasiones, produciendo un total de 378 valores de



corriente que ingresa al cuerpo humano y 1134 que se distribuye, obteniendo por simulación un total de 1512 valores de corriente según se describe en la tabla 7.

Descargas atmosféricas indirectas:

Para iniciar la simulación, se establece las variables de contorno, distancia $L1 = 340\text{m}$, distancia $L2 = 50\text{m}$, intensidad de corriente de descarga atmosférica $ICDA = 5\text{Ka}$, extremidad por donde ingresa la corriente $EXT = \text{brazo izquierdo}$, esta primera simulación permite obtener 4 valores de corriente, la primera que es el valor de corriente que ingresa al cuerpo humano por la extremidad de contacto ($ICIH_{BI}$) y las otras 3 son las que se distribuyen por el cuerpo humano en el brazo derecho, pierna izquierda y pierna derecha respectivamente ($ICIH_{BD}$, $ICIH_{PI}$ y $ICIH_{PD}$). Posteriormente se procede a variar la Intensidad de corriente de descarga atmosférica ($ICDA$) 21 veces (5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260 kA), se repite este procedimiento, pero ahora variando la extremidad de ingreso, siendo estas 3 (brazo izquierdo, brazo derecho y cabeza), seguidamente se procede a variar la distancia $L2$ 4 veces (50, 100, 150, 200 m), obteniendo un total de 252 valores de corriente que ingresan al cuerpo humano, finalmente se varia la distancia $L1$ (340, 500 y 660m) por 3 ocasiones, produciendo un total de 756 valores de corriente que ingresa al cuerpo humano y 2268 que se distribuye, obteniendo por simulación un total de 3780 valores de corriente según se describe en la tabla 8.

Esto permite, describir un universo de estudio en la simulación para rayos directos e indirectos, en concordancia a las variables de contorno definidas en los dos escenarios, obteniendo un total de 4536 muestras, divididas en 1512 para rayos directos y 3024 para rayos indirectos.



3.2 Descripción de las variables de contorno.

Definimos las variables de contorno a todas aquellas variables dinámicas que permiten representar los diferentes escenarios de simulación.

3.2.1 Variables dependientes y variables independientes.

Las tablas 3 y 4, describen las variables independientes y la variable dependiente en la simulación para la descarga atmosférica directa e indirecta, respectivamente.

Tabla 3. Variables que intervienen en la descarga atmosférica directa.

VARIABLE DEPENDIENTE.	VARIABLES INDEPENDIENTES.		
ICIH: Intensidad de corriente que ingresa al ser humano.	L1: la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el ser humano (liniero) en metros.	ICDA: la intensidad de corriente de la descarga atmosférica en Amperios.	EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.

Fuente: El Autor.

Tabla 4. Variables que intervienen en la descarga atmosférica indirecta.

VARIABLE DEPENDIENTE	VARIABLES INDEPENDIENTES			
ICIH: Intensidad de corriente que ingresa al ser humano.	L1: la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el ser humano (liniero) en metros.	L2: la distancia transversal entre la descarga atmosférica que cae sobre la tierra y la línea de distribución en metros.	ICDA: la intensidad de corriente de la descarga atmosférica en Amperios.	EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.

Fuente: El Autor.



La tabla 5, describe las demás mediciones que son registradas en el caso de rayo directos e indirectos; es decir:

- Registrar la intensidad de la corriente que ingresa por el brazo izquierdo y las intensidades de corriente que se induce al brazo derecho, pierna izquierda y pierna derecha respectivamente.
- Registrar la intensidad de la corriente que ingresa por el brazo derecho y las intensidades de corriente que se inducen al brazo izquierdo, pierna izquierda y pierna derecha respectivamente.
- Registrar la intensidad de la corriente que ingresa por la cabeza y las intensidades de corriente que se inducen al brazo izquierdo, brazo derecho, pierna izquierda y pierna derecha respectivamente.

Tabla 5. Registro de mediciones.

EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.	VALOR DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE			
	ICIH_BI: intensidad de corriente que ingresa o se induce al ser humano por el brazo izquierdo.	ICIH_BD: intensidad de corriente que ingresa o se induce al ser humano por el brazo derecho.	ICIH_PI: intensidad de corriente que ingresa o se induce al ser humano por la pierna izquierda.	ICIH_PD: intensidad de corriente que ingresa o se induce al ser humano por la pierna derecha.

Fuente: El Autor.

La tabla 6, describe la clasificación de los diferentes valores de intensidad de corriente que ingresan al ser humano en las 7 categorías de efectos fisiológicos (Tabla 2), con esta información se procedió a realizar un análisis mediante tablas cruzadas, con el objeto de determinar la incidencia de efectos fisiológicos de la corriente que se induce a las otras extremidades del cuerpo humano.



Tabla 6. Clasificación por efectos fisiológicos.

EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.	VALOR DE LA INTENSIDAD DE LA CORRIENTE			
	EFCA_BI: efecto fisiológico de la corriente alterna en el brazo izquierdo.	EFCA_BD: efecto fisiológico de la corriente alterna en el brazo derecho.	EFCA_PI: efecto fisiológico de la corriente alterna en la pierna izquierda.	EFCA_PD: efecto fisiológico de la corriente alterna en la pierna derecha.

Fuente: El Autor.

3.2.2 Dominios de las variables independientes de la descarga atmosférica directa.

Respecto a los rayos directos, el valor de la descarga atmosférica (ICDA) fueron considerados tal que $5\text{kA} \leq \text{ICDA} \leq 19\text{ kA}$, en incrementos de 2kA amperios; y $20\text{kA} \leq \text{ICDA} \leq 260\text{kA}$ en incrementos de 20kA, respectivamente. Con respecto a la distancia desde el punto de impacto del rayo hasta la ubicación del ser humano (L1) a lo largo del alimentador de distribución, esta fue considerada en valores de 340m, 420m, 500m, 580m, 660m. y 1000m, respectivamente. Cabe recalcar que, para cada uno de los casos de estudio, se procede a variar el valor de corriente de rayo (ICDA) como la longitud (L1), también otra variable considerada es el lugar por donde ingresa la corriente al ser humano, es decir si ingresa por la cabeza, el brazo izquierdo o derecho. Basado en lo anteriormente dicho, el valor de la corriente fue medida en cada una de las partes de cuerpo humano, cabeza, brazo izquierdo y derecho, y pierna izquierda y derecha, respectivamente. Tal como se presenta en la tabla 7.



Tabla 7. Formato de registro de resultados de simulación de la descarga atmosférica directa.

L1(m)	ICDA	EXT.	ICIH_BI	ICIH_BD	ICIH_PI	ICIH_PD
340-420-500-580-660-1000	5000	Brazo Izquierdo				
	.					
	19000	Brazo Derecho				
	20000					
	.	Cabeza				
	260000					

Fuente: El Autor.

3.2.3 Dominios de las variables independientes de la descarga atmosférica indirecta.

Con respecto a los rayos indirectos, las variables se comportan de igual manera que en los rayos directos. Sin embargo, en este caso, la distancia desde el punto de impacto del rayo sobre el suelo hasta el alimentador de distribución (L2) debe ser considerado. En este sentido, su variación (L2) es de 50m, 100m, 150m y 200m. La Tabla 8, representa las variables usadas en el caso de rayos indirectos.

Tabla 8. Formato de registro de resultados de simulación de la descarga atmosférica indirecta.

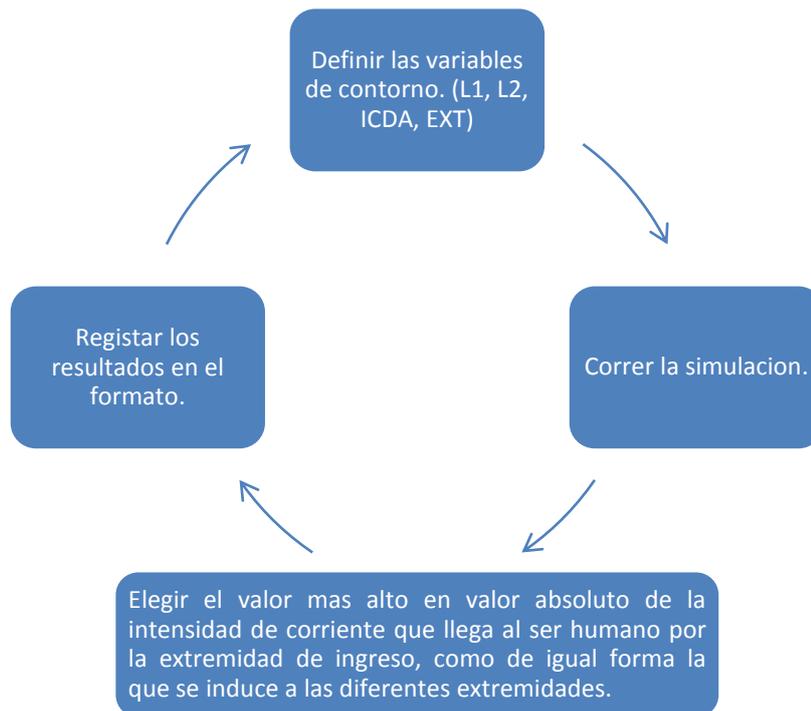
L1(m)	L2(m)	ICDA	EXT.	ICIH_BI	ICIH_BD	ICIH_PI	ICIH_PD
340-500-660	50-100-150-200	5000	Brazo Izquierdo				
		.					
		19000	Brazo Derecho				
		20000					
		.	Cabeza				
		26000					

Fuente: El Autor.

3.3 Procedimiento de obtención de resultados de simulación.

En la figura 4, se describe esquemáticamente el proceso de la obtención de resultados en el simulador.

Figura 4. Esquema de simulación.



Fuente: El Autor.



3.4 Descripción del Análisis Estocástico

Para el análisis estadístico descriptivo y de regresión lineal multivariante, se estableció un intervalo de confianza del 95%.

3.4.1 Procedimiento de análisis estocástico.

1. Crear y definir el tipo de variables, en el software de analisis.
2. Alimentar la informacion en las diferentes variables en el software de analisis.
3. Analizar la correlacion de Pearson, R cuadrado y el valor de significancia.
4. Analizar la viabilidad de la hipotesis (Nula o alternativa)
5. Ejecutar la regresion lineal
6. Describir el modelo

3.4.2 Modelo de Regresión Lineal múltiple.

Los resultados a obtener permitirán describir la relación entre diversas variables independientes y una variable dependiente; que mediante el método de análisis de regresión múltiple como técnica descriptiva o como técnica de inferencia, permitirá definir el modelo lineal de regresión (Lind, Marchal, & Wathen, 2005).



Descarga directa:

$$ICIH = a + b1.L1 + b2.ICDA$$

Descarga indirecta:

$$ICIH = a + b1.L1 + b2.L2 + b3.ICDA$$

En donde a, b1, b2, b3 son los valores de los coeficientes de la ecuación lineal múltiple, los mismos que son determinados mediante el método de mínimos cuadrados. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)



CAPITULO IV: RESULTADOS



4.1 ANÁLISIS ESTOCÁSTICO

En este apartado se realiza un análisis estocástico de los resultados de simulación obtenidos en el software libre ATPDraw, los mismos que se encuentran clasificados en las tablas en los diferentes anexos.

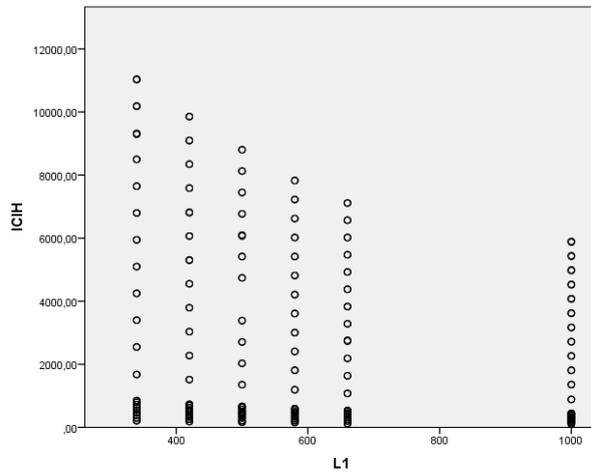
El software libre ATPDraw (Alternative Transients Program), permite simular digitalmente los fenómenos transitorios de fenómenos electromagnéticos, así como la naturaleza electromecánica en los sistemas de energía eléctrica (Prikler & Hoidalén, 2009).

4.1.1 Análisis estocástico de la descarga atmosférica directa.

Se define “Directo” a la descarga atmosférica que impacta las líneas de distribución aérea y que se induce por la misma hasta el ser humano (Liniero). Figura 2.

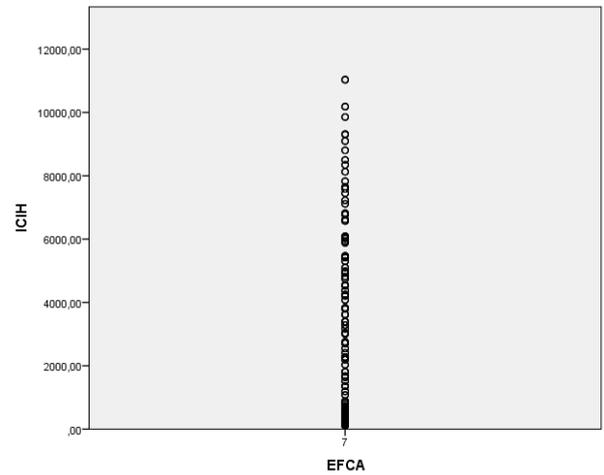
En el Anexo 3, se observa que la descarga atmosférica directa, produce sobre el ser humano un efecto de quemaduras muy graves, parada cardíaca con elevada probabilidad de muerte en todos los casos, es decir el efecto fisiológico 7 (ver tabla 2) predomina independientemente de la distancia a la cual se produzca la descarga atmosférica.

Figura 5. Grafica de dispersión L1 - ICIH



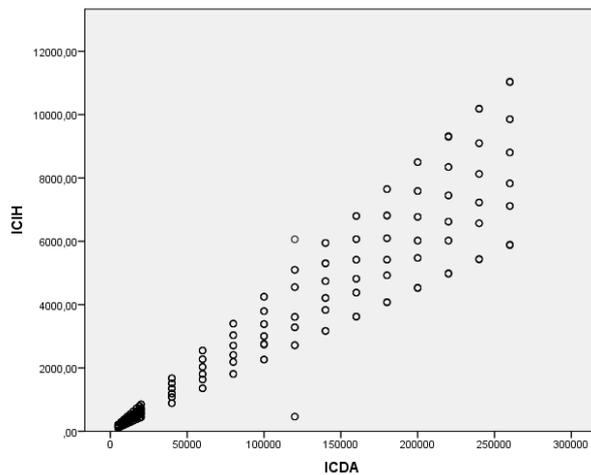
Fuente: El Autor.

Figura 7. Grafica de dispersión EFCA - ICIH



Fuente: El Autor.

Figura 6. Grafica de dispersión ICDA - ICIH



Fuente: El Autor.

En la figura 5 se describe las pruebas de simulación, estableciendo una relación inversamente proporcional a la distancia L1, manteniendo valores altos en la intensidad de corriente que ingresa en el ser humano (ICIH), efecto fisiológico 7.

La figura 6 representa las pruebas de simulación, estableciendo una relación directamente proporcional entre la variable ICDA y ICIH, a mayor ICDA mayor ICIH, efecto fisiológico 7.



La figura 7 describe las pruebas de simulación, estableciendo que ICIH producto de la ICDA directa, produce un efecto fisiológico 7, en todos los casos; es decir, es imperturbable a la distancia.

4.1.1.1 Regresión multivariable de la descarga atmosférica directa:

En este apartado se describe la relación entre las diversas variables independientes y una variable dependiente mediante análisis de regresión múltiple, realizando un análisis paso a paso, es decir variable a variable, analizando los diferentes indicadores como la correlación de Pearson, R cuadrado, Anova, permitiéndonos así definir los coeficientes del modelo multivariante de regresión lineal.

4.1.1.1.1 Variables de la descarga atmosférica directa.

Variable dependiente:

ICIH: Intensidad de corriente que ingresa al ser humano.

Variables independientes:

L1: la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el ser humano (liniero) en metros.

ICDA: la intensidad de corriente de la descarga atmosférica en Amperios.

EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.

EFCA: clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna.

La tabla 9, determina la correlación existente entre la variable dependiente y las independientes, estableciendo una correlación positiva fuerte entre las variables ICDA y ICIH, y una correlación negativa débil entre las variables L1 y ICIH.



Tabla 9. Correlaciones - descarga atmosférica directa

		ICIH	L1	ICDA
Correlación de Pearson	ICIH	1	-0,192	0,954
	L1	-0,19	1	0
	ICDA	0,954	0	1
Sig. (unilateral)	ICIH	.	0	0
	L1	0	.	0,5
	ICDA	0	0,5	.
N	ICIH	378	378	378
	L1	378	378	378
	ICDA	378	378	378

Fuente: El Autor.

La tabla 10, establece el valor de $R = 0.954$ y R cuadrado = 0.911 , determinando una correlación positiva fuerte; es decir, el modelo es adecuado y explica o predice la variable intensidad de corriente que ingresa al ser humano ICIH, por lo tanto, la variable independiente tiene una incidencia del 91.1% sobre de la variable dependiente.

Tabla 10. Resumen del modelo - descarga atmosférica directa

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,954 ^a	0,911	0,911	868,5419
2	,974 ^b	0,948	0,948	664,7018

Fuente: El Autor.

Para el análisis de la tabla 11, Anova (análisis de la varianza), se plantean las siguientes hipótesis:

H0; las variables son independientes

H1; las variables son dependientes (tienen correlación)

Al analizar el nivel de significancia, éste es menor al 1%, por lo razón se rechaza la hipótesis nula (Ho), concluyendo que el modelo de regresión lineal es adecuado y se ajusta la variable dependiente con las variables independientes. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)



Tabla 11. ANOVA - descarga atmosférica directa

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	2,9E+09	1	2,9E+09	3850,276	,000 ^b
	Residuo	2,84E+08	376	754365		
	Total	3,19E+09	377			
2	Regresión	3,02E+09	2	1,51E+09	3420,409	,000 ^c
	Residuo	1,66E+08	375	441828,5		
	Total	3,19E+09	377			

Fuente: El Autor.

La tabla 12, establece los valores de los coeficientes $a = 1515,235$; $b_1 = -2.622$; $b_2 = 0.032$ que describen el modelo de regresión multivariante. Además, describe la inexistencia de colinealidad entre las variables; es decir, que no existe correlación entre las variables independientes ya que el factor de inflación de la varianza (VIF) es menor de 10. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)

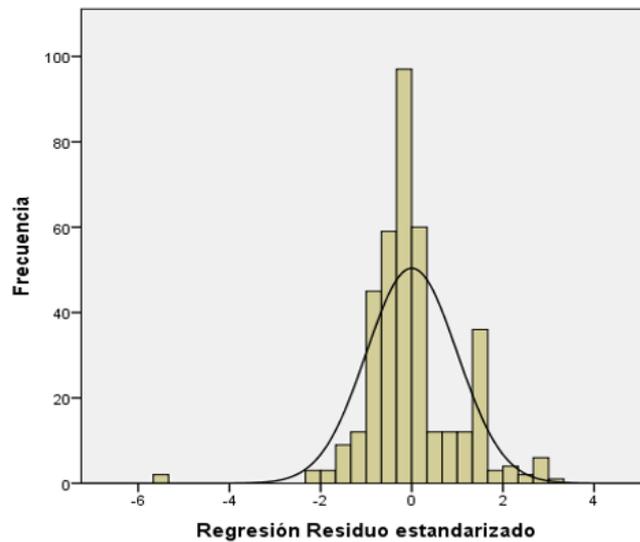
Tabla 12. Coeficientes - descarga atmosférica directa

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticas de colinealidad	
		B	Error estándar	Beta			Tolerancia	VIF
1	(Constante)	-14,286	65,27		-0,219	0,827		
	ICDA	0,032	0,001	0,954	62,051	0	1	1
2	(Constante)	1515,235	106,1		14,281	0		
	ICDA	0,032	0	0,954	81,079	0	1	1
	L1	-2,622	0,16	-0,192	16,339	0	1	1

Fuente: El Autor.

La figura 8, describe la distribución de los datos, mediante un histograma.

Figura 8. Histograma variable dependiente ICIH - descarga atmosférica directa



Fuente: El Autor.

4.1.1.2 Modelo de regresión lineal de la descarga atmosférica directa.

Modelo:

$$ICIH \text{ directa} = a + b1.L1 + b2.ICDA$$

Coeficientes:

$$a = 1515,235$$

$$b1 = -2.622$$

$$b2 = 0.032$$

$$ICIH \text{ directa} = 1515,235 - 2.622 L1 + 0,032 ICDA$$

La ecuación obtenida mediante modelo de regresión lineal permite establecer la intensidad de corriente que ingresa al cuerpo humano, cuando una descarga atmosférica impacta sobre la línea de distribución.

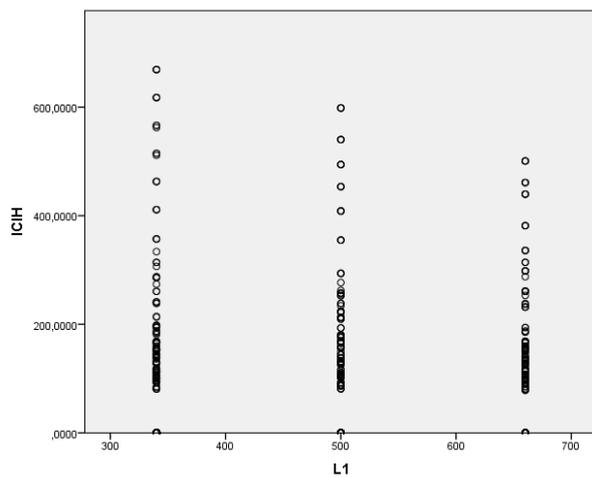


4.1.2 ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE LAS DESCARGA ATMOSFÉRICA INDIRECTA

Definimos “Indirecto” a la descarga atmosférica que impacta sobre la tierra y se induce hacia las líneas de distribución aérea y luego hacia el ser humano (Liniero).

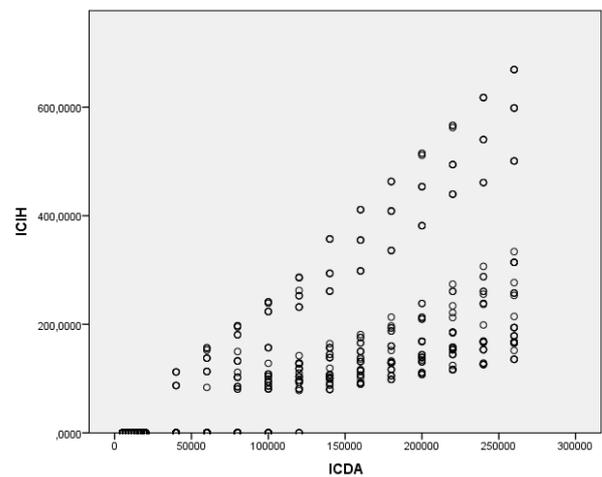
En el Anexo 4, se observa que la descarga atmosférica indirecta produce sobre el ser humano diferentes efectos fisiológicos, diferenciándose de la descarga directa, permitiendo realizar un análisis estocástico más profundo entre las diferentes variables.

Figura 9. Grafica de dispersión L1 - ICIH



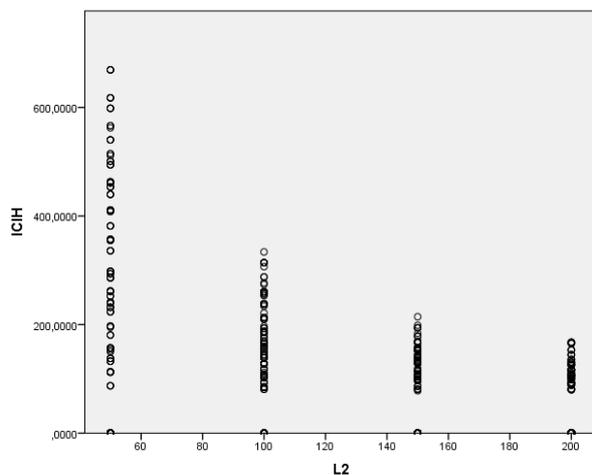
Fuente: El Autor.

Figura 11. Grafica de dispersión ICDA - ICIH



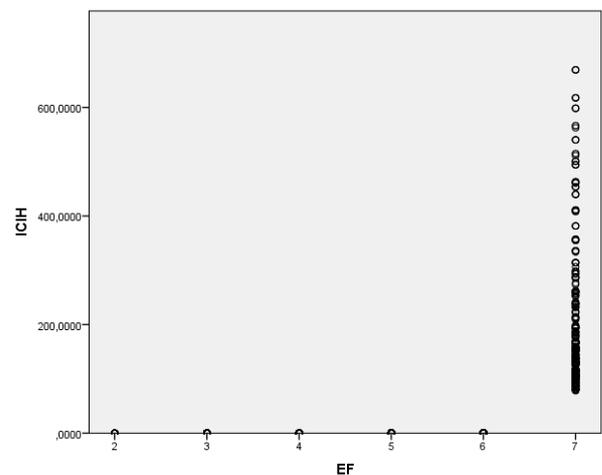
Fuente: El Autor.

Figura 10. Grafica de dispersión L2 - ICIH



Fuente: El Autor.

Figura 12. Grafica de dispersión EFCA - ICIH



Fuente: El Autor.

En la figura 9, se describe las pruebas de simulación, estableciendo una relación inversamente proporcional suave, entre la variable distancia L1 y ICIH.

En la figura 10, se describe las pruebas de simulación, estableciendo una relación inversamente proporcional fuerte, entre la variable distancia L2 y ICIH.

En la figura 11, se describe las pruebas de simulación, estableciendo una relación directamente proporcional entre las variables ICDA y ICIH.

En la figura 12, se describe las pruebas de simulación, estableciendo que existe mayores EFCA clase 7, sin descartar la presencia de otros EFCA.

4.1.2.1 Regresión multivariable de la descarga atmosférica indirecta:

En este apartado se representa la relación entre las diversas variables independientes y una variable dependiente, mediante análisis de regresión múltiple paso a paso, correlación de Pearson, R cuadrado, Anova, lo que permitirá definir los coeficientes del modelo de regresión.

4.1.2.1.1 Variables de la descarga atmosférica indirecta.

Variable dependiente:

ICIH: Intensidad de corriente que ingresa al ser humano.

Variables independientes:

L1: la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el ser humano (liniero) en metros.

L2: la distancia transversal entre la descarga atmosférica que cae sobre la tierra y la línea de distribución en metros (ver figura 3).



ICDA.: la intensidad de corriente de la descarga atmosférica en Amperios.

EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.

EFCA: clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna.

La tabla 13, determina la correlación existente entre la variable dependiente y las independientes, estableciendo una correlación moderada alta entre las variables ICDA y ICIH, y una correlación negativa moderada débil entre las variables L1, L2 y ICIH, como se describe a continuación.

Tabla 13. Correlaciones - descarga atmosférica indirecta

		L1	L2	ICDA	ICIH
L1	Correlación de Pearson	1	0	0	-0,07
	Sig. (bilateral)		1	1	0,073
	N	756	756	756	756
L2	Correlación de Pearson	0	1	0	-,385**
	Sig. (bilateral)	1		1	0
	N	756	756	756	756
ICDA	Correlación de Pearson	0	0	1	,778**
	Sig. (bilateral)	1	1		0
	N	756	756	756	756
ICIH	Correlación de Pearson	-0,07	-,385**	,778**	1
	Sig. (bilateral)	0,073	0	0	
	N	756	756	756	756

Fuente: El Autor.

La tabla 14, establece el valor de $R = 0.870$ y R cuadrado = 0.758, determinando una correlación modera fuerte; es decir, el modelo es adecuado y explica o predice la variable intensidad de corriente que ingresa al ser humano ICIH, por lo tanto, la variable independiente tiene una incidencia del 75.8% sobre de la variable dependiente.



Tabla 14. Resumen del modelo - descarga atmosférica indirecta

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,778 ^a	0,605	0,604	85,9350801
2	,868 ^b	0,753	0,753	67,9602224
3	,870 ^c	0,758	0,757	67,4161271

Fuente: El Autor.

Para el análisis e la tabla 15, Anova (análisis de la varianza), se plantean las siguientes hipótesis:

H0; las variables son independientes

H1; las variables son dependientes (tienen correlación)

Al analizar el nivel de significancia, este menor al 1%, por lo razón se rechaza la hipótesis nula (Ho), describiendo que el modelo de regresión lineal es adecuado y se ajusta la variable dependiente con las variables independientes. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)

Tabla 15. ANOVA - descarga atmosférica indirecta

Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	8526553,89	1	8526553,892	1154,6	,000 ^b
	Residuo	5568167,85	754	7384,838		
	Total	14094721,7	755			
2	Regresión	10616922,1	2	5308461,047	1149,37	,000 ^c
	Residuo	3477799,65	753	4618,592		
	Total	14094721,7	755			
3	Regresión	10676931,2	3	3558977,075	783,065	,000 ^d
	Residuo	3417790,51	752	4544,934		
	Total	14094721,7	755			

Fuente: El Autor.

La tabla 16, establece los valores de los coeficientes $a = 132.24$; $b_1 = 0.001$; $b_2 = -0.941$; $b_3 = -0.068$ que describen el modelo de regresión lineal multivariante. Además, describe la inexistencia de colinealidad entre las variables; es decir, que no

existe correlación entre las variables independientes ya que el factor de inflación de la varianza (VIF) es menor de 10. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)

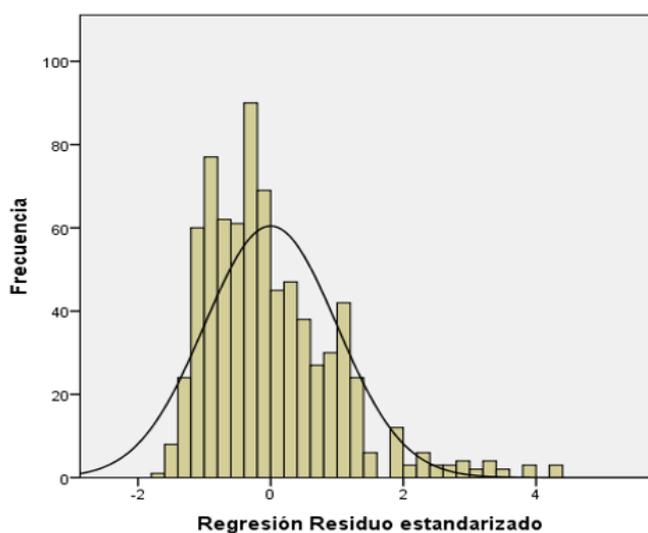
Tabla 16. Coeficientes - descarga atmosférica indirecta

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticas de colinealidad	
		B	Error estándar	Beta			Tolerancia	VIF
1	(Constante)	-19,441	4,566		-4,258	0		
	ICDA	0,001	0	0,778	33,979	0	1	1
2	(Constante)	98,14	6,602		14,865	0		
	ICDA	0,001	0	0,778	42,967	0	1	1
	L2	-0,941	0,044	-0,385	-21,27	0	1	1
3	(Constante)	132,24	11,444		11,556	0		
	ICDA	0,001	0	0,778	43,313	0	1	1
	L2	-0,941	0,044	-0,385	-21,45	0	1	1
	L1	-0,068	0,019	-0,065	-3,634	0	1	1

Fuente: El Autor.

Las figuras 13 describe la distribución de los datos, mediante un histograma.

Figura 13. Histograma variable dependiente ICIH - descarga atmosférica indirecta



Fuente: El Autor.

4.1.2.2 Modelo de regresión lineal de la descarga atmosférica indirecta.

Modelo:



$$ICIH \text{ indirecta} = a + b1.L1 + b2.L2 + b3.ICDA$$

Coeficientes:

$$a = 132.239$$

$$b1 = -0.068$$

$$b2 = -0.941$$

$$b3 = 0.01$$

$$ICIH \text{ indirecta} = 132.239 - 0.068 L1 - 0.941 L2 + 0.001 ICDA$$

La ecuación obtenida mediante modelo de regresión lineal permite establecer la intensidad de corriente que ingresa al cuerpo humano, cuando una descarga atmosférica indirecta impacta sobre el suelo a una distancia L2 de la línea de distribución, la misma que se induce transversalmente hasta la línea de distribución y luego hasta el cuerpo humano (L1).

Con respecto al análisis de descargas atmosférica indirectas, se pudo determinar que de los 756 casos simulados según lo descrito en la sección 3.1, el 13% generan valores de corriente menores a 30 mA (mili Amperios), que basado en la tabla de efectos fisiológicos, contemplarían dentro de los tres primeros rangos, mismos que no representan peligro para el cuerpo humano. Por otra parte, el 77% de los casos analizados en una u otra manera representarían un riesgo para el cuerpo humano que podrían ir desde fuerte tetanización hasta la muerte.

4.1.3 ANÁLISIS ESTOCÁSTICO DE LAS DESCARGA ATMOSFÉRICA INDIRECTA BASADO EN LA CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTOS FISIOLÓGICOS DE LA CORRIENTE ALTERNA.



Para el presente análisis se generan tablas cruzadas que permiten clasificar la incidencia entre las variables independientes L1, L2, ICDA y la variable dependiente EFCA.

La tabla 17 y figura 14, describe la relación directamente proporcional que existe entre ICDA y EFCA, generando EFCA severos a partir de una ICDA de 19000 amperios.

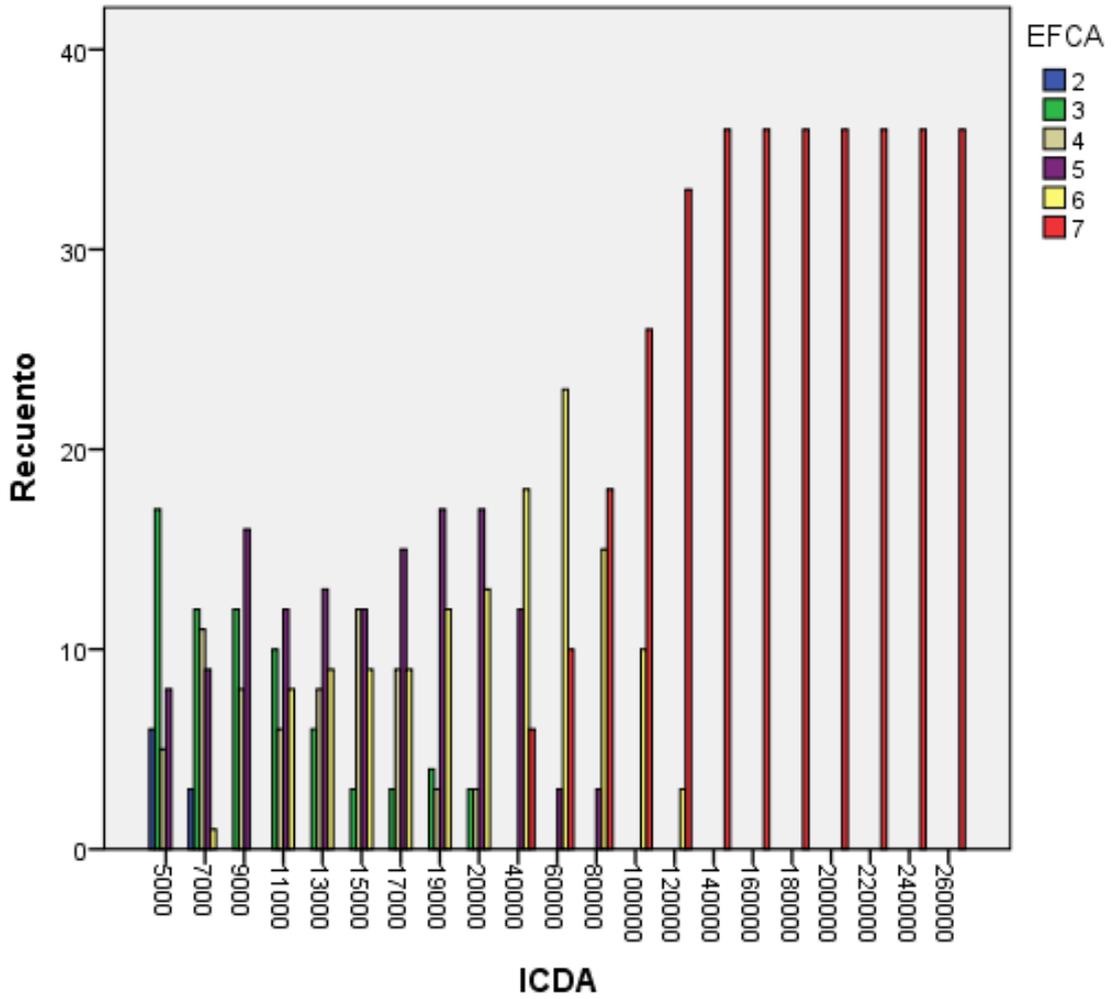
Tabla 17. Tabulación cruzada ICDA*EFCA

Recuento		EFCA					Total	
		2	3	4	5	6		7
ICDA	5000	6	17	5	8	0	0	36
	7000	3	12	11	9	1	0	36
	9000	0	12	8	16	0	0	36
	11000	0	10	6	12	8	0	36
	13000	0	6	8	13	9	0	36
	15000	0	3	12	12	9	0	36
	17000	0	3	9	15	9	0	36
	19000	0	4	3	17	12	0	36
	20000	0	3	3	17	13	0	36
	40000	0	0	0	12	18	6	36
	60000	0	0	0	3	23	10	36
	80000	0	0	0	3	15	18	36
	100000	0	0	0	0	10	26	36
	120000	0	0	0	0	3	33	36
	140000	0	0	0	0	0	36	36
	160000	0	0	0	0	0	36	36
	180000	0	0	0	0	0	36	36
	200000	0	0	0	0	0	36	36
	220000	0	0	0	0	0	36	36
	240000	0	0	0	0	0	36	36
260000	0	0	0	0	0	36	36	
Total		9	70	65	137	130	345	756

Fuente: El Autor.



Figura 14. Grafica de barra de tabulación cruzada ICDA*EFCA



Fuente: El Autor.



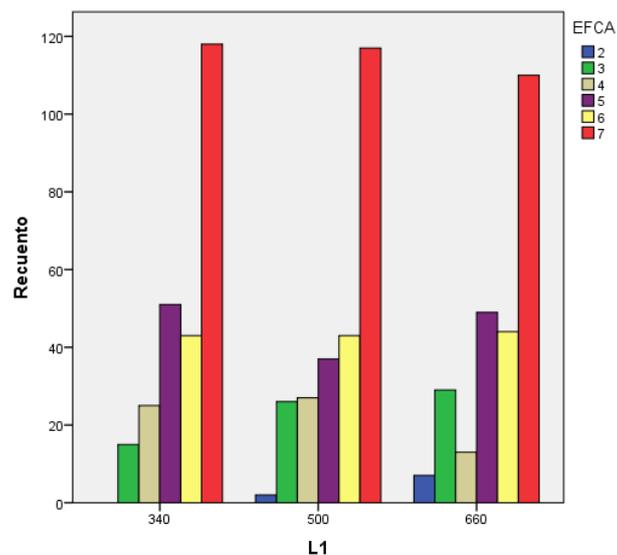
La tabla 18 y figura 15, describe que la distancia L1, no es una variable preponderante, por que independientemente de la distancia L1, el comportamiento de EFCA son similares.

Tabla 18. Tabulación cruzada L1*EFCA

		EFCA					Total	
		2	3	4	5	6		7
L1	340	0	15	25	51	43	118	252
	500	2	26	27	37	43	117	252
	660	7	29	13	49	44	110	252
Total		9	70	65	137	130	345	756

Fuente: El Autor.

Figura 15. Grafica de barra de tabulación cruzada L1*EFCA



Fuente: El Autor.

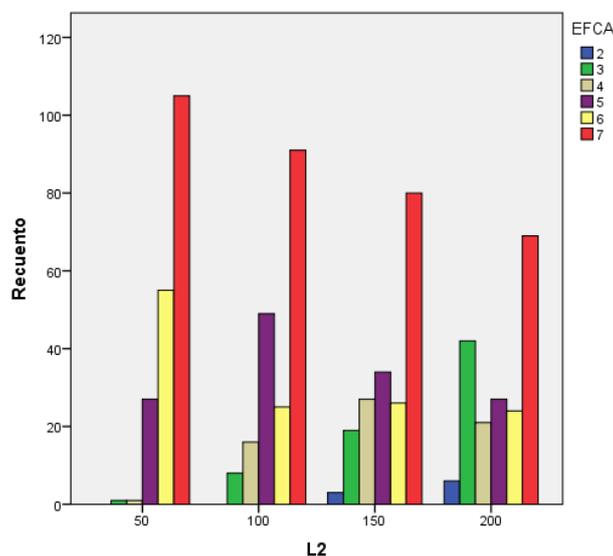
La tabla 19 y figura 16, describe que la distancia L2 es inversamente proporcional a los EFCA, observando que a mayor distancia L2 disminuye los EFCA de clase 5,6,7.

Tabla 19. Tabulación cruzada L2*EFCA.

		EFCA					Total	
		2	3	4	5	6		7
L2	50	0	1	1	27	55	105	189
	100	0	8	16	49	25	91	189
	150	3	19	27	34	26	80	189
	200	6	42	21	27	24	69	189
Total		9	70	65	137	130	345	756

Fuente: El Autor.

Figura 16. Grafica de barra de tabulación cruzada L2*EFCA



Fuente: El Autor.

4.1.3.1 Regresión multivariable de la descarga atmosférica indirecta, basado en EFCA.

En este apartado se describe la relación entre las diversas variables independientes y una variable dependiente, mediante análisis de regresión múltiple paso a paso, correlación de Pearson, R cuadrado, Anova, lo que permitirá definir los coeficientes del modelo de regresión en función de los EFCA.



4.1.3.1.1 Variables de la descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.

Variable dependiente:

EFCA: clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna.

Variables independientes:

L1: la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el ser humano (liniero) en metros.

L2: la distancia transversal entre la descarga atmosférica que cae sobre la tierra y la línea de distribución en metros.

ICDA: la intensidad de corriente de la descarga atmosférica en Amperios.

EXT: la extremidad por donde ingresa la intensidad de corriente inducida por la línea de distribución aérea.

EFCA_BI: efecto fisiológico de la corriente alterna en el brazo izquierdo.

EFCA_BD: efecto fisiológico de la corriente alterna en el brazo derecho.

EFCA_PI: efecto fisiológico de la corriente alterna en la pierna izquierda.

EFCA_PD: efecto fisiológico de la corriente alterna en la pierna derecha

La tabla 20, establece el valor de $R = 0.816$ y R cuadrado = 0.665, determinando una correlación moderada; es decir, el modelo explica o predice la variable intensidad de corriente que ingresa al ser humano ICIH, por lo tanto, la variable independiente tiene una incidencia del 66.5% sobre de la variable dependiente.



Tabla 20. Resumen del modelo - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,816 ^a	0,665	0,664	0,811

Fuente: El Autor.

Para el análisis en la tabla 21, Anova (análisis de la varianza), se plantean las siguientes hipótesis:

H0; las variables son independientes

H1; las variables son dependientes (tienen correlación)

Al analizar el nivel de significancia, éste es menor al 1%, por lo razón se rechaza la hipótesis nula (H₀), describiendo que el modelo de regresión lineal es adecuado y se ajusta la variable dependiente con las variables independientes. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)

Tabla 21. ANOVA - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.

Modelo	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1 Regresión	984	3	328	498,6	,000 ^b
Residuo	494,667	752	0,658		
Total	1478,667	755			

Fuente: El Autor.

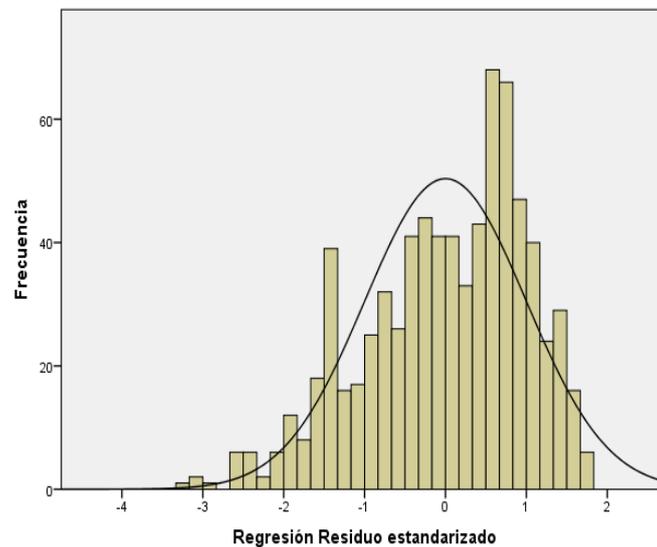
La tabla 22, establece los valores de los coeficientes $a = 5.948$; $b_1 = -0.001$; $b_2 = -0.008$; $b_3 = 1.23 * 10^{-5}$ que describen el modelo de regresión lineal multivariante. Además, describe la inexistencia de colinealidad entre las variables; es decir, que no existe correlación entre las variables independientes ya que el factor de inflación de la varianza (VIF) es menor de 10. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)

Tabla 22. Coeficientes - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticas de colinealidad	
	B	Error estándar	Beta			Tolerancia	VIF
(Constante)	5,948	0,138		43,2	0		
1 L1	-0,001	0	-0,06	-2,856	0	1	1
L2	-0,008	0,001	-0,31	-14,68	0	1	1
ICDA	1,23E-05	0	0,752	35,67	0	1	1

Fuente: El Autor.

Figura 17. Histograma variable dependiente ICIH - descarga atmosférica indirecta en función de los EFCA.



Fuente: El Autor.

4.1.3.2 Modelo de regresión lineal de la descarga atmosférica indirecta.

Modelo:

$$EFCA \text{ indirecto} = a + b1.L1 + b2.L2 + b3.ICDA$$

Coeficientes:

$$a = 5.948$$



$$b1 = -0.001$$

$$b2 = -0.008$$

$$b3 = 1.228 * 10^{-5}$$

$$EFCA \text{ indirecto} = 5.948 - 0.001 L1 - 0.008 L2 + 1.228 * 10^{-5} ICDA$$

La ecuación determinada en este trabajo de tesis permite determinar qué efecto fisiológico se producirá sobre el cuerpo humano, cuando una descarga atmosférica indirecta impacta sobre el suelo y se varié la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el cuerpo humano (L1), la distancia transversal entre la descarga atmosférica que cae sobre la tierra y la línea de distribución (L2) y la intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA).

4.1.3.3 Error estándar de estimación Múltiple:

El error de estimación múltiple 1.4 es el error típico cuando se emplea la ecuación para predecir los efectos fisiológicos de la corriente alterna que ingresa al ser humano. (Lind, Marchal, & Wathen, 2005)

$$S_{Y.123\dots k} = \sqrt{\frac{SSR}{n - (k + 1)}}$$

- **SSR** es la suma de los cuadrados del residuo de la tabla ANOVA.
- **n** es el número de observaciones en la muestra.
- **k** es el número de variables independientes.

$$S_{Y.123\dots k} = \sqrt{\frac{1478.667}{756 - (3 + 1)}} = 1.40$$



4.1.4 Clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna por estratos.

En el siguiente apartado se realiza la clasificación al Brazo Izquierdo, Brazo Derecho y Cabeza como puntos de ingreso de la intensidad corriente alterna al cuerpo del ser humano y los efectos fisiológicos que ocasionan en las otras extremidades, mediante el uso de tablas cruzadas.

4.1.4.1 Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por el Brazo Izquierdo y los efectos fisiológicos propagados en las otras extremidades.

Las tablas 23, 24 y 25, describen el efecto fisiológico que la corriente alterna produce cuando ingresa por una extremidad, en este caso al brazo izquierdo (EFCA_BI), produciendo otro efecto fisiológico en la extremidad de salida, que puede ser el brazo derecho (EFCA_BD), pierna izquierda (EFCA_PI) y pierna derecha (EFCA_PD), las mismas que se representan gráficamente en las figuras 18, 19 y 20.

La tabla 23 y figura 18, describen si la corriente ingresa por el brazo izquierdo y es distribuida por el cuerpo, el brazo derecho tiene un efecto fisiológico 1 que predomina.

Tabla 23. Tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_BD.

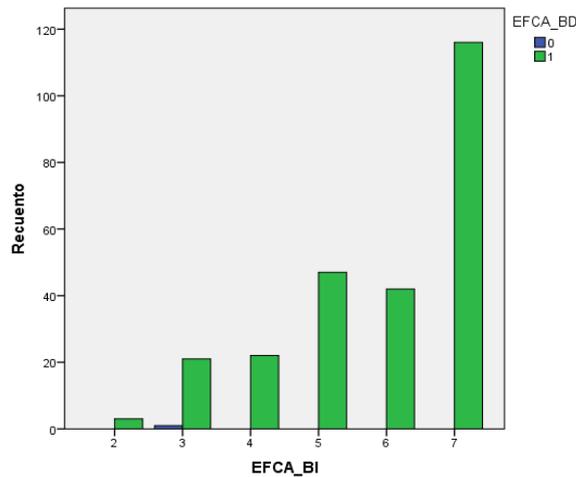
		EFCA_BD		Total
		0	1	
EFCA_BI	2	0	3	3



	3	1	21	22
	4	0	22	22
	5	0	47	47
	6	0	42	42
	7	0	116	116
Total		1	251	252

Fuente: El Autor.

Figura 18. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_BD



Fuente: El Autor.

Las tablas 24 y 25 y las figuras 19 y 20, describe que cuando la corriente ingresa por el brazo izquierdo y es distribuida por el cuerpo, las piernas derecha e izquierda experimenta efectos fisiológicos 3, 5, y 7 que predominan, el mismo que está relacionado con la intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA).

Tabla 24. Tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PI

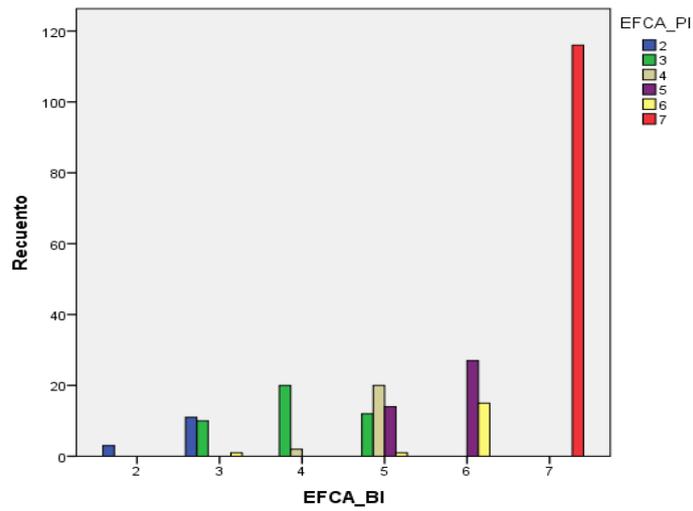
		EFCA_PI						Total
		2	3	4	5	6	7	
EFCA_BI	2	3	0	0	0	0	0	3
	3	11	10	0	0	1	0	22



4	0	20	2	0	0	0	22
5	0	12	20	14	1	0	47
6	0	0	0	27	15	0	42
7	0	0	0	0	0	116	116
Total	14	42	22	41	17	116	252

Fuente: El Autor.

Figura 19. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PI



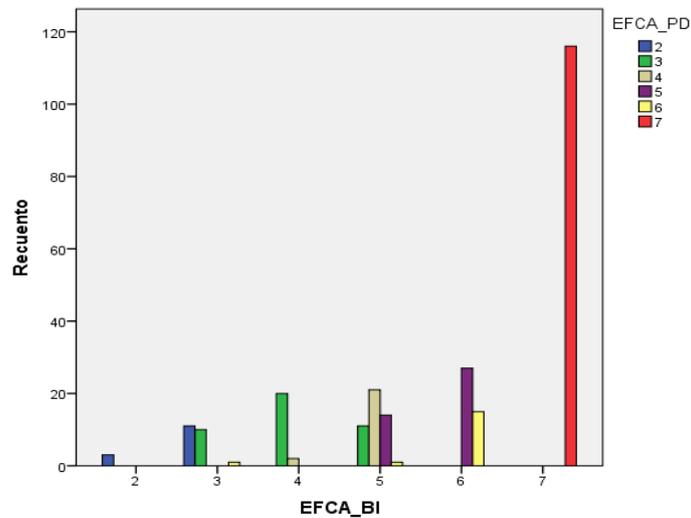
Fuente: El Autor.

Tabla 25. Tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PD

	EFCA_PD						Total
	2	3	4	5	6	7	
2	3	0	0	0	0	0	3
3	11	10	0	0	1	0	22
4	0	20	2	0	0	0	22
5	0	11	21	14	1	0	47
6	0	0	0	27	15	0	42
7	0	0	0	0	0	116	116
Total	14	41	23	41	17	116	252

Fuente: El Autor.

Figura 20. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BI*EFCA_PD



Fuente: El Autor.

4.1.4.2 Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por el Brazo Derecho y los efectos fisiológicos propagados en las otras extremidades.

Las tablas 26, 27 y 28, describen el efecto fisiológico que la corriente alterna produce cuando ingresa por una extremidad, en este caso al brazo derecho (EFCA_BD), produciendo otro efecto fisiológico en la extremidad de salida, que puede ser el brazo izquierdo (EFCA_BI), pierna izquierda (EFCA_PI) y pierna derecha (EFCA_PD), las mismas que se representan gráficamente en las figuras 21, 22 y 23.

La tabla 26 y figura 21, describen si la corriente ingresa por el brazo derecho y es distribuida por el cuerpo, el brazo izquierdo tiene un efecto fisiológico 1 que predomina.

Tabla 26. Tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_BI

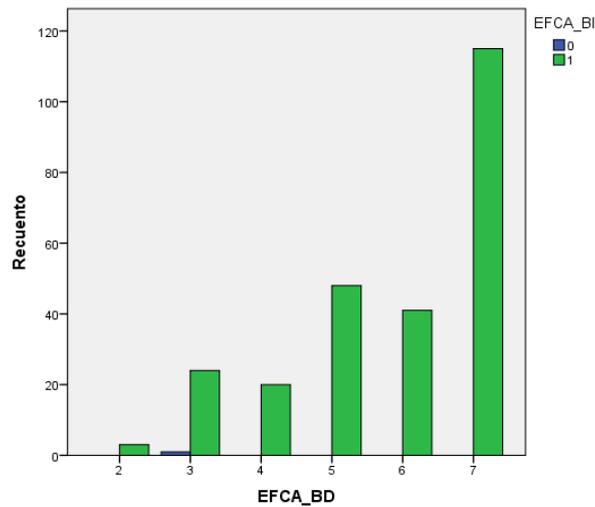
		EFCA_BI		Total
		0	1	
EFCA_BD	2	0	3	3



	3	1	24	25
	4	0	20	20
	5	0	48	48
	6	0	41	41
	7	0	115	115
Total		1	251	252

Fuente: El Autor.

Figura 21. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_BI



Fuente: El Autor.

Las tablas 27 y 28 y las figuras 22 y 23, describe que cuando la corriente ingresa por el brazo derecho y es distribuida por el cuerpo, las piernas derecha e izquierda experimenta efectos fisiológicos 3, 5 y 7 que predominan, el mismo que está relacionado con la intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA).

Tabla 27. Tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PI

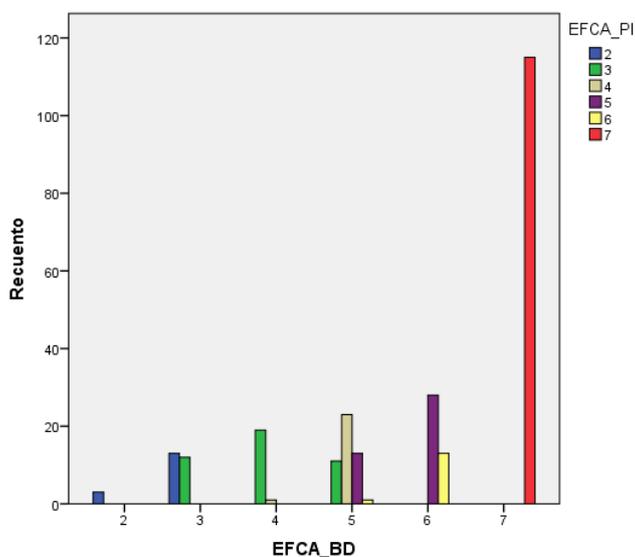
		EFCA_PI						Total
		2	3	4	5	6	7	
EFCA_BD	2	3	0	0	0	0	0	3
	3	13	12	0	0	0	0	25



4	0	19	1	0	0	0	20
5	0	11	23	13	1	0	48
6	0	0	0	28	13	0	41
7	0	0	0	0	0	115	115
Total	16	42	24	41	14	115	252

Fuente: El Autor.

Figura 22. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PI



Fuente: El Autor.

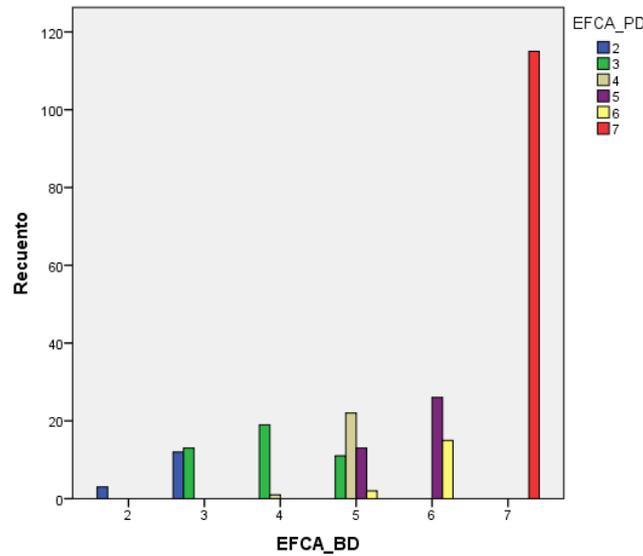
Tabla 28. Tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PD

		EFCA_PD						Total
		2	3	4	5	6	7	
EFCA_BD	2	3	0	0	0	0	0	3
	3	12	13	0	0	0	0	25
	4	0	19	1	0	0	0	20
	5	0	11	22	13	2	0	48
	6	0	0	0	26	15	0	41
	7	0	0	0	0	0	115	115
Total		15	43	23	39	17	115	252

Fuente: El Autor.



Figura 23. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_BD*EFCA_PD



Fuente: El Autor.

4.1.4.3 Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por la Cabeza y los efectos fisiológicos propagados en las otras extremidades.

Las tablas 29, 30, 31 y 32, describen el efecto fisiológico que la corriente alterna produce cuando ingresa por la cabeza (EFCA_C), produciendo otro efecto fisiológico en la extremidad de salida, que puede ser el brazo izquierdo (EFCA_BI), brazo derecho (EFCA_BD), pierna izquierda (EFCA_PI) y pierna derecha (EFCA_PD), las mismas que se representan gráficamente en las figuras 24, 25 y 26.

Las tablas 29 y 30 y las figuras 24 y 25, describen si la corriente ingresa por la cabeza y es distribuida por el cuerpo, el brazo izquierdo y brazo derecho tendrán un efecto fisiológico 1 que predomina.

Tabla 29. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BI

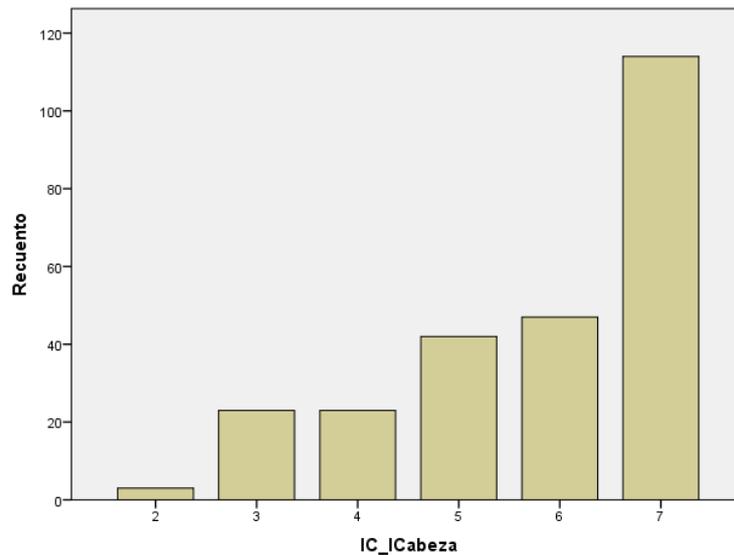
		EFCA_BI		Total
		1		
EFCA_C	2	3		3
	3	23		23



	4	23	23
	5	42	42
	6	47	47
	7	114	114
Total		252	252

Fuente: El Autor.

Figura 24. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BI



Fuente: El Autor.

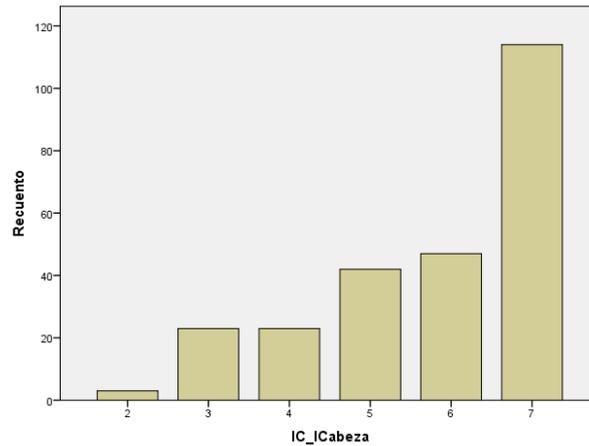
Tabla 30. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BD

		EFCA_BD	
		1	Total
EFCA_C	2	3	3
	3	23	23
	4	23	23
	5	42	42
	6	47	47
	7	114	114
Total		252	252

Fuente: El Autor.



Figura 25. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_BD



Fuente: El Autor.

Las tablas 31 y 32 y las figuras 26 y 27, describen que cuando la corriente ingresa por la cabeza y es distribuida por el cuerpo, las piernas derecha e izquierda experimenta efectos fisiológicos 3, 5 y 7 que predominan, mismos que están relacionados con la intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA).

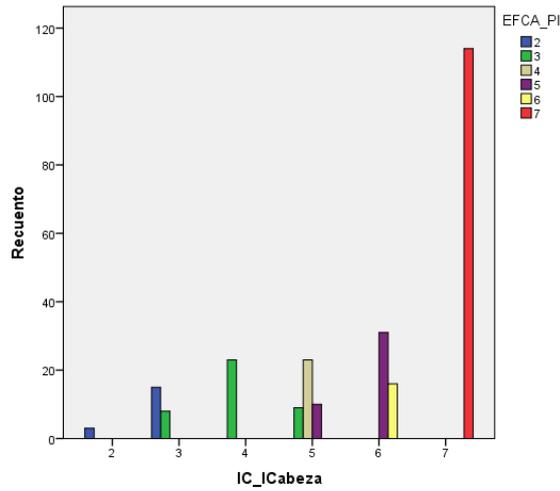
Tabla 31. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PI

	EFCA_PI						Total
	2	3	4	5	6	7	
2	3	0	0	0	0	0	3
3	15	8	0	0	0	0	23
4	0	23	0	0	0	0	23
5	0	9	23	10	0	0	42
6	0	0	0	31	16	0	47
7	0	0	0	0	0	114	114
Total	18	40	23	41	16	114	252

Fuente: El Autor.



Figura 26. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PI



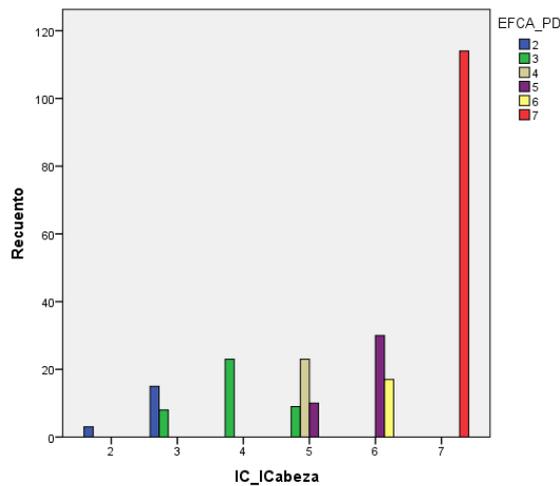
Fuente: El Autor.

Tabla 32. Tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PD

	EFCA_PD						Total
	2	3	4	5	6	7	
2	3	0	0	0	0	0	3
3	15	8	0	0	0	0	23
4	0	23	0	0	0	0	23
5	0	9	23	10	0	0	42
6	0	0	0	30	17	0	47
7	0	0	0	0	0	114	114
Total	18	40	23	40	17	114	252

Fuente: El Autor.

Figura 27. Grafica de barra de tabulación cruzada EFCA_C*EFCA_PD



Fuente: El Autor.



CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



De los resultados del trabajo de tesis presentado, considerando descargas atmosféricas directas e indirectas, se establece como conclusiones:

1. Que los efectos fisiológicos producidos por una **descarga atmosférica directa** (figura 2), pueden ocasionar quemaduras muy graves, parada cardiaca con elevada probabilidad de muerte, estableciendo que la distancia a la cual impacta el rayo sobre las líneas de distribución aérea (L1), no es factor que influye inversamente proporcional sobre los efectos fisiológicos en el caso de las descargas atmosféricas directas (figura 5, figura 6). Basado en los resultados, se pudo evidenciar que el valor de la corriente que ingresa al cuerpo humano independientemente de su extremidad de contacto estableciendo un valor mínimo de 107 Amperios y un valor máximo de 11046 Amperios, y de acuerdo con los efectos fisiológicos producidos por la corriente (tabla 2), la persona moriría.
2. Existe una relación directamente proporcional entre la variable intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA) e intensidad de corriente de ingreso al ser humano (ICIH); es decir, a mayor intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA), mayor intensidad de corriente de ingreso al cuerpo humano (ICIH), produciendo efectos fisiológicos de quemaduras muy graves y parada cardiaca con elevada probabilidad de muerte. (ver figura 6).
3. La intensidad de corriente de ingreso al ser humano (ICIH) producto de la intensidad de corriente de la descarga atmosférica directa (ICDA), produce un efecto fisiológico 7 (tabla 2) quemaduras muy graves y parada cardiaca con elevada probabilidad de muerte, en todos los casos; es decir, es imperturbable a la distancia a la cual impactase la descarga atmosférica sobre la línea aérea de distribución. (ver figura 7).
4. Por análisis de regresión lineal multivariable, de una muestra de 378 simulaciones descrita en la sección Materiales y Métodos, definimos el modelo de regresión multivariante que describe la intensidad de corriente que ingresa al ser humano (ICIH) en función de la distancia L1 y la intensidad de corriente de la descarga



atmosférica (ICDA). En donde, ingresando únicamente el valor de la distancia y la intensidad de corriente de la descarga atmosférica, se puede determinar la intensidad de corriente que ingresaría al cuerpo humano.

$$ICIH \text{ directa} = 1515,235 - 2.622 L1 + 0,032 ICDA$$

5. El modelo permite determinar la intensidad de corriente que ingresa al cuerpo humano, cuando una descarga atmosférica directa impacta sobre el suelo y se varíe la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el cuerpo humano (L1) y la intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA).
6. Los efectos fisiológicos producidos por una **descarga atmosférica indirecta** (figura 3), ocasionan efectos fisiológicos tipo 2, 3, 4, 5, 6 y 7 predominando el efecto 7 (figura 12). Además, se describe una relación directamente proporcional entre las variables ICDA y ICIH. (Figura 12)
7. Por análisis de regresión lineal multivariable, de una muestra de 756 simulaciones descrita en la sección Materiales y Métodos, definimos el modelo de regresión multivariante que describe la intensidad de corriente que ingresa al ser humano (ICIH) en función de la distancia L1, L2 y la intensidad de descarga atmosférica ICDA:

$$ICIH \text{ indirecta} = 132.239 - 0.068 L1 - 0.941 L2 + 0.001 ICDA$$

8. El modelo permite determinar la intensidad de corriente que ingresa al cuerpo humano, cuando una descarga atmosférica indirecta impacta sobre el suelo y se varíe la distancia entre la descarga atmosférica que es inducida sobre la línea de distribución aérea hasta el cuerpo humano (L1), la distancia transversal entre la descarga atmosférica que cae sobre la tierra y la línea de distribución (L2) y la intensidad de corriente de la descarga atmosférica (ICDA).



9. La clasificación de la intensidad de corriente que ingresa al ser humano por efectos fisiológicos, permite relacionar los efectos que se producen en las otras extremidades, definiendo en la tabla 17 y figura 14 una relación directamente proporcional que existe entre la intensidad de corriente que ingresa al ser humano (ICDA) y los efectos fisiológicos (EFCA), produciendo efectos fisiológicos EFCA severos a partir de una intensidad de corriente de a descarga atmosférica (ICDA) de 19000 amperios. Además, se describe que la distancia L2 es inversamente proporcional a los EFCA, observando que a mayor distancia L2 disminuye los EFCA de clase 5,6,7. (tabla 19 y figura 16). Esto permite definir el modelo de regresión lineal multivariante de la descarga atmosférica indirecta clasificada por efectos fisiológicos:

$$EFCA \text{ indirecto} = 5.948 - 0.001 L1 - 0.008 L2 + 1.228 * 10^{-5} ICDA$$

Recomendación: el modelo de Efectos Fisiológicos (EFCA indirecto) determinado por regresión multivariante, es recomendado como herramienta que nos permita estimar los efectos fisiológicos que puede ocasionar una descarga atmosférica indirecta cuando un ser humano está expuesto, cabe recordar que el modelo presenta un error de estimación múltiple 1.4.

Trabajos futuros: poder realizar un análisis para la implementación de diferentes equipos a lo largo del alimentador de distribución, tales como: para rayos, hilos de guarda, entre otros que permita disminuir el valor de corriente que circularía por el cuerpo humano. Además, realizar un análisis sobre los equipos de protección personal ante la presencia de descargas atmosféricas, especialmente los guantes dieléctricos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bermúdez Luque, J. J. (2012). *Prevención de riesgos laborales y medioambientales en el montaje y mantenimiento de instalaciones eléctricas en telefonía*. Málaga, SPAIN: IC Editorial. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupssp/detail.action?docID=3211362>
- Bovea Edo, M. D. (2011). *Manual de seguridad e higiene industrial para la formación en ingeniería*. Castellón de la Plana, SPAIN: Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupssp/detail.action?docID=3217226>
- Cabral, R. J., Gazzana, D. S., Leborgne, R. C., Bretas, A. S., Dias, G. A. D., & Telló, M. (2012). Analysis of distribution lines performance against lightning using ATP-EMTP. In *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on* (pp. 1–6). IEEE.
- Castaño, S. R. (2004). *Redes de Distribución de Energía*.
- Cortés Díaz, J. M. (2012). *Seguridad e higiene: técnicas de prevención de riesgos laborales (10a. ed.)*. Madrid, ES: Editorial Tébar Flores.
- Darveniza, M., Holcombe, B. C., & Stillman, R. H. (1979). An improved method for calculating the impulse strength of wood porcelain insulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (6), 1909–1915.
- Dommel, H. W. (1986). *Electromagnetic Transients Program: Reference Manual:(EMTP theory book)*. Bonneville Power Administration.
- El Telégrafo. (2016). El Telégrafo - Los rayos alcanzaron a una persona cada 45 días en el país. Retrieved February 1, 2018, from <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/1/los-rayos-alcanzaron-a-una-persona-cada-45-dias-en-el-pais>



- Físicas, F. D. E. C., & Fernández-montes, J. A. G. (2002). *Universidad complutense de madrid*.
- Gabarda, L. P. (1993). NTP 400: Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano. *Ministerio de Trabajo Y Asuntos Sociales de España*, 9. Retrieved from http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_400.pdf
- Gibilisco, S., Sclater, N., & García Díaz, R. (1994). *Electrónica: diccionario enciclopédico. Tomo 1*. Distrito Federal, UNKNOWN: McGraw-Hill Interamericana. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupssp/detail.action?docID=4435321>
- Group, I. F. F. T. W. (1996). Modeling Guidelines for Fast Transients. *IEEE Trans on Power Delivery*, 11(1), 493–506.
- Henao Robledo, F. (2014). *Riesgos eléctricos y mecánicos (2a. ed.)*. Bogotá, COLOMBIA: Ecoe Ediciones. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupssp/detail.action?docID=4870566>
- ISASTUR. (2010). Manual Seguridad e Instrucciones de Trabajo. Retrieved from https://www.isastur.com/external/seguridad/data/es/1/1_1.htm
- Lara Almazán, F. R. (2012). *Prevención de riesgos laborales y medioambientales en el montaje y mantenimiento de instalaciones eléctricas de alta tensión (UF0994)*. Málaga, SPAIN: IC Editorial. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupssp/detail.action?docID=3212714>
- Levy, R. R. (2010). *Las puestas a tierra: criterios de seguridad eléctrica y técnica*. Buenos Aires, ARGENTINA: Jorge Sarmiento Editor - Universitas. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaupssp/detail.action?docID=3213195>
- Prikler, L., & Hoidalén, H. K. (2009). ATPDraw ver 5.6 for Windows



9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual. *Users' Manual*, (1), 1–270.

Proceedings, P. H.-P. T. C., IEEE, 2003, & 2003, undefined. (n.d.). The dependence of the expectable number of transmission line faults on the degree of the compactness. *ieeexplore.ieee.org*. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1304688/>

Salvatierra, B. G., Dominguez, D. H., & Morales, J. A. (2015). Analysis of electric shock human safety to residential , industrial and medium voltage levels ., 1–6. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2015.7395085>

Villarrubia, M. (2000). Seguridad eléctrica : efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano. *Montajes E Instalaciones*, 51–59.

Links

https://books.google.es/books?id=_RGIvwd2A84C&pg=PA201&dq=corriente+electric+a+y+cuerpo+humano&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtwanAy4zWAhVEOCYKHWv1C_AQ6AEIRzAG#v=onepage&q=corriente%20electrica%20y%20cuerpo%20humano&f=false

<http://bibliotecavirtual.ups.edu.ec:2051/lib/bibliotecaupssp/reader.action?docID=11162183#>

https://books.google.es/books?id=5R7pPAAACAAJ&dq=corriente+electrica+y+cuerpo+humano&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtwanAy4zWAhVEOCYKHWv1C_AQ6AEILDAB

https://books.google.es/books?id=Y35TDM74KmUC&pg=PA250&dq=corriente+electrica+y+cuerpo+humano&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtwanAy4zWAhVEOCYKHWv1C_AQ6AEIMDAC#v=onepage&q=corriente%20electrica%20y%20cuerpo%20humano&f=false

https://books.google.es/books?id=qHZmSqZS_fwC&pg=PA207&dq=corriente+electrica+y+cuerpo+humano&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtwanAy4zWAhVEOCYKHWv1C



_AQ6AEIOzAE#v=onepage&q=corriente%20electrica%20y%20cuerpo%20humano&f=false

https://books.google.es/books?id=kWZd0XcB1cC&pg=PA221&dq=corriente+electrica+y+cuerpo+humano&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtwanAy4zWAhVEOCYKHWv1C_AQ6AEINTAD#v=onepage&q=corriente%20electrica%20y%20cuerpo%20humano&f=false



ANEXOS

ANEXO 1 - DESCARGA ATMOSFÉRICA DIRECTA

L1 [m]	ICDA [A]	EXT.	IC.EXT. [A]			
			Brazo Izquierdo	Brazo Derecho	Pierna Izquierda	Pierna Derecha
340	5000	Brazo Izquierdo	209,47	4,230E-10	105,35	105,35
	7000		294,52	6,121E-10	147,26	147,26
	9000		378,5	7,877E-10	189,25	189,25
	11000		462,34	9,601E-10	231,17	231,17
	13000		546,29	1,135E-09	273,14	273,14
	15000		630,42	1,312E-09	315,21	315,21
	17000		722,4	1,502E-09	361,2	361,2
	19000		798,4	1,655E-09	399,2	399,2
	20000		849,86	1,768E-09	424,93	424,93
	40000		1676	3,490E-09	838,5	838,5
	60000		2549,4	5,302E-09	1274,7	1274,7
	80000		3399,6	6,956E-09	1699,8	1699,8
	100000		4249	8,843E-10	2124,5	2124,5
	120000		5098,7	1,058E-08	2549,4	2549,4
	140000		5948,2	1,235E-08	2974,1	2974,1
	160000		6798,2	1,414E-08	3399,1	3399,1
	180000		7647,6	1,587E-08	3823,8	3823,8
	200000		8497,3	1,763E-08	4248,6	4248,6
	220000		9320,8	1,939E-08	4643,1	4643,1
	240000		10176	2,115E-08	5098,1	5098,1
	260000	11024	2,292E-08	5523	5523	
	5000	Brazo Derecho	4,230E-10	210,69	105,35	105,35
	7000		6,121E-10	294,52	147,26	147,26
	9000		7,877E-10	378,5	189,25	189,25
	11000		9,601E-10	462,34	231,17	231,17
	13000		1,135E-09	546,29	273,14	273,14
	15000		1,312E-09	630,42	315,21	315,21
	17000		1,502E-09	722,4	361,2	361,2
	19000		1,655E-09	798,4	399,2	399,2
	20000		1,768E-09	849,86	424,93	424,93
	40000		3,490E-09	1676	838,5	838,5
	60000		5,302E-09	2549,4	1274,7	1274,7
	80000		6,956E-09	3399,6	1699,8	1699,8
	100000		8,843E-10	4249	2124,5	2124,5
120000	1,058E-08		5098,7	2549,4	2549,4	
140000	1,235E-08		5948,2	2974,1	2974,1	
160000	1,414E-08		6798,2	3399,1	3399,1	



	180000		1,587E-08	7647,6	3823,8	3823,8
	200000		1,763E-08	8497,3	4248,6	4248,6
	220000		1,939E-08	9320,8	4643,1	4643,1
	240000		2,115E-08	10176	5098,1	5098,1
	260000		2,292E-08	11024	5523	5523
	5000	Cabeza	4,394E-10	4,394E-10	105,35	105,35
	7000		6,121E-10	6,121E-10	147,26	147,26
	9000		7,877E-10	7,877E-10	189,25	189,25
	11000		9,601E-10	9,601E-10	231,17	231,17
	13000		1,135E-09	1,135E-09	273,14	273,14
	15000		1,312E-09	1,312E-09	315,21	315,21
	17000		1,502E-09	1,502E-09	361,2	361,2
	19000		1,655E-09	1,655E-09	399,2	399,2
	20000		1,768E-09	1,768E-09	424,93	424,93
	40000		3,490E-09	3,490E-09	838,5	838,5
	60000		5,302E-09	5,302E-09	1274,7	1274,7
	80000		6,956E-09	6,956E-09	1699,8	1699,8
	100000		8,843E-10	8,843E-10	2124,5	2124,5
	120000		1,058E-08	1,058E-08	2549,4	2549,4
	140000		1,235E-08	1,235E-08	2974,1	2974,1
	160000		1,414E-08	1,414E-08	3399,1	3399,1
	180000		1,587E-08	1,587E-08	3823,8	3823,8
	200000		1,763E-08	1,763E-08	4248,6	4248,6
	220000		1,939E-08	1,939E-08	4643,1	4643,1
	240000		2,115E-08	2,115E-08	5098,1	5098,1
	260000	2,292E-08	2,292E-08	5523	5523	

L1 [m]	ICDA [A]	EXT.	IC.EXT. [A]			
			Brazo Izquierdo	Brazo Derecho	Pierna Izquierda	Pierna Derecha
420	5000	Brazo Izquierdo	183,26	3,811E-10	91,563	91,563
	7000		256,32	5,329E-10	128,16	128,16
	9000		329,55	6,842E-10	164,77	164,77
	11000		402,73	8,369E-10	201,37	201,37
	13000		476,18	9,882E-10	238,09	238,09
	15000		549,18	1,143E-09	274,59	274,59
	17000		622,39	1,297E-09	311,2	311,2
	19000		695,6	1,442E-09	347,8	347,8
	20000		732,21	1,525E-09	366,1	366,1
	40000		1515,5	3,155E-09	756,73	756,73
	60000		2275,5	4,738E-09	1137,8	1137,8



80000		3034,5	6,318E-09	1517,2	1517,2
100000		3793	7,898E-09	1896,5	1896,5
120000		4551	9,476E-09	2275,5	2275,5
140000		5309,7	1,103E-08	2646,5	2646,5
160000		6068,2	1,263E-08	3034,1	3034,1
180000		6805,2	1,421E-08	3413,4	3413,4
200000		7585,6	1,576E-08	3792,8	3792,8
220000		8343,7	1,734E-08	4171,9	4171,9
240000		9094,4	1,891E-08	4551,3	4551,3
260000		9852,2	2,052E-08	4930,5	4930,5
5000	Brazo Derecho	3,811E-10	183,26	91,563	91,563
7000		5,329E-10	256,32	128,16	128,16
9000		6,842E-10	329,55	164,77	164,77
11000		8,369E-10	402,73	201,37	201,37
13000		9,882E-10	476,18	238,09	238,09
15000		1,143E-09	549,18	274,59	274,59
17000		1,297E-09	622,39	311,2	311,2
19000		1,442E-09	695,6	347,8	347,8
20000		1,525E-09	732,21	366,1	366,1
40000		3,155E-09	1515,5	756,73	756,73
60000		4,738E-09	2275,5	1137,8	1137,8
80000		6,318E-09	3034,5	1517,2	1517,2
100000		7,898E-09	3793	1896,5	1896,5
120000		9,476E-09	4551	2275,5	2275,5
140000		1,103E-08	5309,7	2646,5	2646,5
160000		1,263E-08	6068,2	3034,1	3034,1
180000		1,421E-08	6805,2	3413,4	3413,4
200000		1,576E-08	7585,6	3792,8	3792,8
220000		1,734E-08	8343,7	4171,9	4171,9
240000		1,891E-08	9094,4	4551,3	4551,3
260000	2,052E-08	9852,2	4930,5	4930,5	
5000	Cabeza	3,811E-10	3,811E-10	91,563	91,563
7000		5,329E-10	5,329E-10	128,16	128,16
9000		6,842E-10	6,842E-10	164,77	164,77
11000		8,369E-10	8,369E-10	201,37	201,37
13000		9,882E-10	9,882E-10	238,09	238,09
15000		1,143E-09	1,143E-09	274,59	274,59
17000		1,297E-09	1,297E-09	311,2	311,2
19000		1,442E-09	1,442E-09	347,8	347,8
20000		1,525E-09	1,525E-09	366,1	366,1
40000		3,155E-09	3,155E-09	756,73	756,73
60000		4,738E-09	4,738E-09	1137,8	1137,8



	80000		6,318E-09	6,318E-09	1517,2	1517,2
	100000		7,898E-09	7,898E-09	1896,5	1896,5
	120000		9,476E-09	9,476E-09	2275,5	2275,5
	140000		1,103E-08	1,103E-08	2646,5	2646,5
	160000		1,263E-08	1,263E-08	3034,1	3034,1
	180000		1,421E-08	1,421E-08	3413,4	3413,4
	200000		1,576E-08	1,576E-08	3792,8	3792,8
	220000		1,734E-08	1,734E-08	4171,9	4171,9
	240000		1,891E-08	1,891E-08	4551,3	4551,3
	260000		2,052E-08	2,052E-08	4930,5	4930,5



ANEXO 2 – DESCARGA ATMOSFÉRICA INDIRECTA

L1 [m]	L2 [m]	ICDA [A]	EXT.	IC.EXT. [A]				
				Brazo Izquierdo	Brazo Derecho	Pierna Izquierda	Pierna Derecha	
340	50	5000	Brazo Izquierdo	0,053	1,140E-13	0,026	0,026	
		7000		0,05	1,500E-13	0,025	0,0252	
		9000		0,0964	2,060E-13	0,0481	0,048	
		11000		0,0792	1,660E-13	0,0398	0,0398	
		13000		0,139	2,980E-13	0,0696	0,0696	
		15000		0,16	3,440E-13	0,08	0,08	
		17000		0,182	3,900E-13	0,0908	0,0906	
		19000		0,02	4,360E-13	0,101	0,101	
		20000		0,214	4,590E-13	0,106	0,107	
		40000		112,09	2,340E-10	56,04	56,14	
		60000		152,52	3,130E-10	74,51	74,79	
		80000		197,26	3,370E-10	98,67	98,67	
		100000		241,28	4,960E-10	120,71	120,71	
		120000		286,91	5,870E-10	142,3	142,3	
		140000		357,06	6,790E-10	178,53	178,53	
		160000		411,19	7,770E-10	205,57	205,59	
		180000		463,05	8,700E-10	231,31	231,55	
		200000		511,17	9,690E-10	257,4	257,4	
		220000		562,32	1,060E-09	283,02	283,02	
		240000		617,54	1,160E-09	308,96	308,96	
		260000	669,14	1,260E-09	334,32	334,32		
		5000	Brazo Derecho	5000	1,140E-13	0,036	0,026	0,026
		7000		1,600E-13	0,0749	0,037	0,037	
		9000		2,060E-13	0,096	0,048	0,048	
		11000		2,520E-13	0,117	0,058	0,058	
		13000		2,980E-13	0,139	0,0696	0,0695	
		15000		3,440E-13	0,16	0,0801	0,0802	
		17000		3,900E-13	0,18	0,091	0,091	
		19000		4,360E-13	0,2	0,1	0,1	
		20000		4,590E-13	0,214	0,106	0,106	
		40000		2,360E-10	112,32	56,11	56,15	
		60000		3,290E-10	155,59	78,55	78,55	
80000	4,150E-10	197,46		97,25	97,25			
100000	4,960E-10	238,82		120,71	120,71			
120000	5,850E-10	285,78		139,57	139,57			
140000	6,750E-10	357,2		178,6	178,6			
160000	7,770E-10	411,19		205,59	205,59			



		180000		8,734E-10	463,05	231,55	231,55
		200000		9,704E-10	514,79	257,4	257,4
		220000		1,069E-09	566,05	283,19	283,19
		240000		1,160E-09	617,54	308,96	308,96
		260000		1,260E-09	669,14	334,57	334,57
		5000	Cabeza	1,140E-13	1,140E-13	0,0267	0,0267
		7000		1,600E-13	1,600E-13	0,03749	0,03749
		9000		2,067E-13	2,067E-13	0,0482	0,0482
		11000		2,528E-13	2,528E-13	0,0589	0,0589
		13000		2,988E-13	2,988E-13	0,0696	0,0696
		15000		3,449E-13	3,449E-13	0,0803	0,0803
		17000		3,900E-13	3,900E-13	0,091	0,091
		19000		4,368E-13	4,368E-13	0,101	0,101
		20000		4,593E-13	4,593E-13	0,1071	0,1071
		40000		2,360E-10	2,360E-10	56,156	56,156
		60000		3,290E-10	3,290E-10	78,553	78,553
		80000		4,152E-10	4,152E-10	97,533	97,533
		100000		5,070E-10	5,070E-10	120,71	120,71
		120000		5,960E-10	5,960E-10	142,89	142,89
		140000		6,830E-10	6,830E-10	178,6	178,6
		160000		7,770E-10	7,770E-10	205,59	205,59
		180000		8,730E-10	8,730E-10	231,55	231,55
		200000		9,700E-10	9,700E-10	257,4	257,4
		220000		1,066E-09	1,066E-09	283,19	283,19
		240000		1,163E-09	1,163E-09	308,96	308,96
		260000	1,260E-09	1,260E-09	334,57	334,57	
	100	5000	Brazo Izquierdo	0,0278	6,01E-14	0,0138	0,0139
		7000		0,039	8,41E-14	0,0192	0,0195
		9000		0,0501	1,08E-113	0,025	0,025
		11000		0,0611	1,32E-13	0,0306	0,0306
		13000		0,0724	1,556E-13	0,0362	0,0362
		15000		0,0835	1,8E-13	0,0417	0,0417
		17000		0,0947	2,04E-13	0,0473	0,0473
		19000		0,105	2,28E-13	0,0529	0,0529
		20000		0,111	2,4E-13	0,0557	0,0557
		40000		0,222	4,8E-13	0,111	0,111
		60000		83,69	1,76E-10	41,87	41,87
		80000		111,49	2,385E-10	55,73	55,73
		100000		128,09	2,7E-10	64,289	64,289
		120000		142,22	3,1941E-10	71,357	71,357
	140000	164,28	3,548E-10	82,138	82,138		
	160000	181,18	4,14E-10	90,66	90,66		



		180000		196,95	4,47E-10	108,37	108,37
		200000		213,24	5,04E-10	122,44	122,44
		220000		273,87	5,575E-10	139,2	139,2
		240000		306,62	6,1E-10	153,31	153,31
		260000		333,78	6,62E-10	166,89	166,89
		5000	Brazo Derecho	5,3175E-14	0,024825	0,012413	0,012413
		7000		7,4447E-14	0,034755	0,017378	0,017378
		9000		9,4094E-14	0,044685	0,022343	0,022343
		11000		1,1699E-13	0,05377	0,027308	0,027308
		13000		1,3827E-13	0,064545	0,032273	0,032273
		15000		1,5955E-13	0,074475	0,037238	0,037238
		17000		1,808E-13	0,084405	0,042203	0,042203
		19000		1,9856E-13	0,094335	0,047168	0,047168
		20000		2,127E-13	0,099301	0,04965	0,04965
		40000		4,254E-13	0,1986	0,099301	0,099301
		60000		5,5799E-13	0,25953	0,12976	0,12976
		80000		1,807E-10	85,205	42,603	42,603
		100000		2,81E-10	93,701	46,846	46,846
		120000		1,3239E-10	118,29	59,282	59,282
		140000		1,5483E-10	138,65	69,266	69,266
		160000		1,5014E-10	150,04	75,113	75,113
		180000		2,0093E-10	159,93	79,965	79,965
		200000		3,9611E-10	168,91	84,537	84,537
		220000		4,044E-10	185,62	92,811	92,811
		240000		5,455E-10	260,66	130,33	130,33
		260000	6,4669E-10	314,12	157,06	157,06	
		5000	Cabeza	5,9295E-14	5,9295E-14	0,014011	0,014011
		7000		8,3009E-14	8,3009E-14	0,019616	0,019616
		9000		1,0672E-13	1,0672E-13	0,02522	0,02522
		11000		1,3044E-13	1,3044E-13	0,030825	0,030825
		13000		1,5415E-13	1,5415E-13	0,03643	0,03643
		15000		1,7788E-13	1,7788E-13	0,042034	0,042034
		17000		2,0158E-13	2,0158E-13	0,047639	0,047639
		19000		2,2531E-13	2,2531E-13	0,053242	0,053242
		20000		2,3714E-13	2,3714E-13	0,056044	0,056044
		40000		4,7436E-13	4,7436E-13	0,11206	0,11206
		60000		5,288E-13	5,288E-13	0,12279	0,12279
		80000		6,6673E-10	6,6673E-10	40,372	40,372
		100000		2,1671E-10	2,1671E-10	52,124	52,124
		120000		2,6295E-10	2,6295E-10	63,551	63,551
		140000		2,8183E-10	2,8183E-10	72,342	72,342
		160000	3,4663E-10	3,4663E-10	82,847	82,847	



		180000		3,9116E-10	3,9116E-10	93,826	93,826		
		200000		4,9324E-10	4,9324E-10	119,21	119,21		
		220000		5,4555E-10	5,4555E-10	130,33	130,33		
		240000		5,975E-10	5,975E-10	143,86	143,86		
		260000		6,4669E-10	6,4669E-10	157,06	157,06		
	150	5000	Brazo Izquierdo	0,020652	4,4054E-14	0,010326	0,010326		
		7000		0,028913	6,1675E-14	0,014457	0,014457		
		9000		0,037174	7,92297E-14	0,018587	0,018587		
		11000		0,045435	9,69E-14	0,022717	0,022717		
		13000		0,053695	1,145E-13	0,026848	0,026848		
		15000		0,030978	1,3186E-13	0,030978	0,030978		
		17000		0,047382	9,8908E-14	0,01299	0,01299		
		19000		0,078478	1,674E-13	0,039239	0,039239		
		20000		0,082608	1,7621E-13	0,0441304	0,0441304		
		40000		0,16522	3,525E-13	0,082608	0,082608		
		60000		0,24783	5,2871E-13	0,12391	0,12391		
		80000		0,24535	5,3561E-13	0,12268	0,12268		
		100000		80,875	1,784E-12	35,47	35,47		
		120000		96,793	2,0096E-10	48,315	48,315		
		140000		99,811	2,07E-10	49,704	49,704		
		160000		114,59	2,3821E-10	57,255	57,255		
		180000		128,74	2,6892E-10	64,399	64,399		
		200000		138,89	2,9071E-10	69,46	69,46		
		220000		153,28	3,1978E-10	76,518	76,518		
		240000		166,99	3,4772E-10	83,103	83,103		
		260000		194,02	3,7231E-10	97,01	97,01		
				5000	Brazo Derecho	4,4054E-14	0,020652	0,010326	0,010326
				7000		6,1675E-14	0,028913	0,014457	0,014457
				9000		7,9297E-14	0,037174	0,018587	0,018587
				11000		9,6918E-14	0,045435	0,022717	0,022717
				13000		1,1454E-13	0,053695	0,026848	0,026848
		15000	1,3216E-13	0,061956		0,030978	0,030978		
		17000	1,4978E-13	0,070217		0,035109	0,035109		
		19000	1,674E-13	0,077478		0,039239	0,039239		
		20000	1,7621E-13	0,082608		0,041304	0,041304		
		40000	3,525E-13	0,16522		0,082608	0,082608		
		60000	5,2871E-13	0,24783		0,12391	0,12391		
		80000	5,3561E-13	0,24535		0,12268	0,12268		
		100000	1,784E-12	80,875		35,47	35,47		
		120000	2,0096E-10	96,793		48,315	48,315		
		140000	2,07E-10	99,811		49,704	49,704		
		160000	2,3821E-10	114,59		57,255	57,255		



		180000		2,6892E-10	128,74	64,399	64,399
		200000		2,9071E-10	138,89	69,46	69,46
		220000		3,1978E-10	153,28	76,518	76,518
		240000		3,4772E-10	166,99	83,103	83,103
		260000		3,7231E-10	194,02	97,01	97,01
		5000	Cabeza	6,7191E-14	6,7182E-14	0,0090995	0,0090995
		7000		8,1535E-14	8,1535E-14	0,012436	0,012436
		9000		9,587E-14	9,587E-14	0,015772	0,015772
		11000		1,1021E-13	1,1021E-13	0,019109	0,019109
		13000		1,2452E-13	1,2452E-13	0,022446	0,022446
		15000		1,3888E-13	1,3888E-13	0,025784	0,025784
		17000		1,5319E-13	1,5319E-13	0,02912	0,02912
		19000		1,6755E-13	1,6755E-13	0,032456	0,032456
		20000		1,7472E-13	1,7472E-13	0,034124	0,034124
		40000		3,1811E-13	3,1811E-13	0,067493	0,067493
		60000		4,6143E-13	4,6143E-13	0,10086	0,10086
		80000		6,0965E-13	6,0965E-13	0,13605	0,13605
		100000		2,2475E-10	2,2475E-10	49,554	49,554
		120000		2,3829E-10	2,3829E-10	55,183	55,183
		140000		2,7503E-10	2,7503E-10	59,595	59,595
		160000		3,1818E-10	3,1818E-10	68,05	68,05
		180000		3,4721E-10	3,4721E-10	75,896	75,896
		200000		3,881E-10	3,881E-10	83,873	83,873
		220000		4,2062E-10	4,2062E-10	91,954	91,954
		240000		4,5824E-10	4,5824E-10	99,328	99,328
		260000	4,9396E-10	4,9396E-10	107,19	107,19	
	200	5000	Brazo Izquierdo	0,012535	5,4952E-14	0,0062675	0,0062675
		7000		0,01694	6,4393E-14	0,0084715	0,0084715
		9000		0,021351	7,3825E-14	0,010676	0,010676
		11000		0,025759	8,3258E-14	0,012879	0,012879
		13000		0,030167	9,2708E-14	0,015083	0,015083
		15000		0,034575	1,0214E-13	0,017287	0,017287
		17000		0,038983	1,1157E-13	0,019491	0,019491
		19000		0,043383	1,2102E-13	0,021695	0,021695
		20000		0,045595	1,2573E-13	0,022797	0,022797
		40000		0,089673	2,2013E-13	0,044837	0,044837
		60000		0,13375	3,1449E-13	0,066877	0,066877
		80000		0,17783	4,0885E-13	0,088916	0,088916
		100000		0,22191	5,0328E-13	0,11096	0,11096
		120000		93,122	2,1097E-10	46,596	46,596
	140000	101,89	2,3036E-10	50,954	50,954		
	160000	106,45	2,4807E-10	53,227	53,227		



		180000		116,56	2,8078E-10	58,307	58,307
		200000		130,8	3,1003E-10	65,401	65,401
		220000		144,87	3,3608E-10	72,005	72,005
		240000		153,12	3,5907E-10	76,712	76,712
		260000		167,55	3,8766E-10	83,71	83,71
		5000	Brazo Derecho	5,4952E-14	0,012535	0,0062675	0,0062675
		7000		6,4393E-14	0,016943	0,0084715	0,0084715
		9000		7,3825E-14	0,021351	0,010676	0,010676
		11000		8,3258E-14	0,025759	0,012879	0,012879
		13000		9,2708E-14	0,030167	0,015083	0,015083
		15000		1,0214E-13	0,034575	0,017287	0,017287
		17000		1,1157E-13	0,038983	0,019491	0,019491
		19000		1,2102E-13	0,043391	0,021695	0,021695
		20000		1,2573E-13	0,045595	0,022797	0,022797
		40000		2,2013E-13	0,089673	0,044837	0,044837
		60000		3,1449E-13	0,13375	0,066877	0,066877
		80000		4,0885E-13	0,17783	0,088916	0,088916
		100000		5,0328E-13	0,22191	0,11096	0,11096
		120000		2,1097E-10	93,213	46,596	46,596
		140000		2,3036E-10	101,93	50,954	50,954
		160000		2,4826E-10	106,44	53,227	53,227
		180000		2,8078E-10	116,53	58,307	58,307
		200000		3,1003E-10	130,8	65,401	65,401
		220000		3,3608E-10	144,87	72,005	72,005
		240000		3,5718E-10	153,12	76,712	76,712
		260000	3,8766E-10	167,55	83,71	83,71	
		5000	Cabeza	5,4952E-14	5,4952E-14	0,0062675	0,0062675
		7000		6,4393E-14	6,4393E-14	0,0084715	0,0084715
		9000		7,3825E-14	2,158E-15	0,010676	0,010676
		11000		8,3258E-14	8,3258E-14	0,012879	0,012879
		13000		9,2708E-14	9,2708E-14	0,015083	0,015083
		15000		1,0214E-13	1,0214E-13	0,017287	0,017287
		17000		1,1157E-13	1,1157E-13	0,019491	0,019491
		19000		1,2102E-13	1,2102E-13	0,021695	0,021695
		20000		1,2573E-13	1,2573E-13	0,022797	0,022797
		40000		2,2013E-13	2,2013E-13	0,044837	0,044837
		60000		3,1449E-13	3,1449E-13	0,066877	0,066877
		80000		4,0885E-13	4,0885E-13	0,088916	0,088916
		100000		5,0328E-13	5,0328E-13	0,11096	0,11096
		120000		2,1097E-10	2,1097E-10	46,596	46,596
		140000		2,3036E-10	2,3036E-10	50,954	50,954
		160000		2,4826E-10	2,4826E-10	53,227	53,227



	180000	2,8078E-10	2,8078E-10	58,307	58,307
	200000	3,1003E-10	3,1003E-10	65,401	65,401
	220000	3,3608E-10	3,3608E-10	71,928	71,928
	240000	3,5907E-10	3,5907E-10	76,651	76,651
	260000	3,8766E-10	3,8766E-10	83,71	83,71

ANEXO 3

Clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna en la descarga atmosférica directa.

L1 [m]	ICDA [A]	EXT.	ICIH	EFC A	L1 [m]	ICDA [A]	EXT.	ICIH	EFC A
340	5000	Brazo Izquierdo	209,4 7	7	580	5000	Brazo Izquierdo	154,1 5	7
	7000		294,5 2	7		7000		212,1 6	7
	9000		378,5	7		9000		272,1	7
	11000		462,3 4	7		11000		331,8	7
	13000		546,2 9	7		13000		391,8 7	7
	15000		630,4 2	7		15000		452,3 1	7
	17000		722,4	7		17000		497,8	7
	19000		798,4	7		19000		565,6 5	7
	20000		849,8 6	7		20000		595,5 6	7
	40000		1676	7		40000		1190, 2	7
	60000		2549, 4	7		60000		1805, 3	7
	80000		3399, 6	7		80000		2407, 4	7
	100000		4249	7		100000		3000, 3	7
	120000		5098, 7	7		120000		3610, 7	7
	140000		5948, 2	7		140000		4214, 8	7
	160000		6798, 2	7		160000		4815, 7	7
180000	7647, 6	7	180000	5418	7				
200000	8497, 3	7	200000	6020, 5	7				
220000	9320, 8	7	220000	6620, 9	7				
240000	10176	7	240000	7224, 6	7				
260000	11024	7	260000	7826, 6	7				



5000	Brazo Derecho	210,6 9	7	5000	Brazo Derecho	154,1 5	7
7000		294,5 2	7	7000		212,1 6	7
9000		378,5	7	9000		272,1	7
11000		462,3 4	7	11000		331,8	7
13000		546,2 9	7	13000		391,8 7	7
15000		630,4 2	7	15000		452,3 1	7
17000		722,4	7	17000		497,8	7
19000		798,4	7	19000		565,6 5	7
20000		849,8 6	7	20000		595,5 6	7
40000		1676	7	40000		1190, 2	7
60000		2549, 4	7	60000		1805, 3	7
80000		3399, 6	7	80000		2407, 4	7
100000		4249	7	100000		3000, 3	7
120000		5098, 7	7	120000		3610, 7	7
140000		5948, 2	7	140000		4214, 8	7
160000		6798, 2	7	160000		4815, 7	7
180000		7647, 6	7	180000		5418	7
200000		8497, 3	7	200000		6020, 5	7
220000		9320, 8	7	220000		6620, 9	7
240000		10176	7	240000		7224, 6	7
260000	11024	7	260000	7826, 6	7		
5000	Cabeza	210,7	7	5000	Cabeza	154,1 2	7
7000		294,5 2	7	7000		213,7	7
9000		378,5	7	9000		273	7
11000		462,3 4	7	11000		331,8	7



13000	546,2 8	7	13000	391,8 8	7
15000	630,4 2	7	15000	452,3	7
17000	722,4	7	17000	497,8	7
19000	798,4	7	19000	565,6 6	7
20000	849,8 6	7	20000	595,5 6	7
40000	1677	7	40000	1198	7
60000	2549, 4	7	60000	1817, 26	7
80000	3399, 6	7	80000	2407, 4	7
100000	4249	7	100000	3009, 6	7
120000	5098, 8	7	120000	3610, 8	7
140000	5948, 2	7	140000	4200, 6	7
160000	6798, 2	7	160000	4815, 6	7
180000	7647, 6	7	180000	5418	7
200000	8497, 2	7	200000	6020, 6	7
220000	9286, 2	7	220000	6621	7
240000	10196 ,2	7	240000	7224, 6	7
260000	11046	7	260000	7826, 6	7

ANEXO 4

Clasificación de los efectos fisiológicos de la corriente alterna en la descarga atmosférica indirecta.

L1 [m]	L2 [m]	ICDA [A]	EXT.	ICI H	EF CA	L1 [m]	L2 [m]	ICDA [A]	EXT.	ICI H	EF CA
500	150	5000	Brazo izquierdo	0,0207	3	500	50	5000	Brazo izquierdo	0,0519	5
		7000		0,0289	4			7000		0,0726	5
		9000		0,0372	4			9000		0,0934	5
		11000		0,0454	5			11000		0,114	6
		13000		0,0537	5			13000		0,135	6
		15000		0,031	4			15000		0,1557	6
		17000		0,0474	5			17000		0,1757	6
		19000		0,0785	5			19000		0,1969	6
		20000		0,0826	5			20000		0,2073	6
		40000		0,1652	6			40000		87,138	7
		60000		0,2478	6			60000		137,7	7
		80000		0,2454	6			80000		149,83	7
		100000		80,875	7			100000		223,56	7
		120000		96,793	7			120000		252,4	7
		140000		99,811	7			140000		293,38	7
		160000		114,59	7			160000		355,08	7
180000	128,74	7	180000	408,92	7						
200000	138,89	7	200000	453,59	7						
220000	153,28	7	220000	494,29	7						



	240000		166,9 9	7		240000		540,2 4	7
	260000		194,0 2	7		260000		598,4 3	7
	5000	Brazo Derecho	0,020 7	3		5000	Brazo Derecho	0,051 9	5
	7000		0,028 9	4		7000		0,072 6	5
	9000		0,037 2	4		9000		0,093 4	5
	11000		0,045 4	5		11000		0,114 2	6
	13000		0,053 7	5		13000		0,135	6
	15000		0,062	5		15000		0,155	6
	17000		0,070 2	5		17000		0,176 5	6
	19000		0,077 5	5		19000		0,197 3	6
	20000		0,082 6	5		20000		0,207 6	6
	40000		0,165 2	6		40000		87,37 6	7
	60000		0,247 8	6		60000		137,7	7
	80000		0,245 4	6		80000		181,1 2	7
	100000		80,87 5	7		100000		223,5 6	7
	120000		96,79 3	7		120000		262,2 8	7
	140000		99,81 1	7		140000		294,0 3	7
	160000		114,5 9	7		160000		355,0 8	7
	180000		128,7 4	7		180000		408,1 7	7
	200000		138,8 9	7		200000		453,5 2	7
	220000		153,2 8	7		220000		494,2 9	7
	240000		166,9 9	7		240000		540,2 4	7
	260000	194,0 2	7		260000	598,4 3	7		
	5000	Cabeza	0,018 2	3		5000	Cabeza	0,051 9	5



		7000		0,024 9	3			7000		0,072 6	5
		9000		0,031 5	4			9000		0,093 4	5
		11000		0,038 2	4			11000		0,114 2	6
		13000		0,044 9	5			13000		0,135	6
		15000		0,051 6	5			15000		0,155 6	6
		17000		0,058 2	5			17000		0,176 4	6
		19000		0,064 9	5			19000		0,197 3	6
		20000		0,068 2	5			20000		0,207 7	6
		40000		0,135	6			40000		87,37 6	7
		60000		0,201 7	6			60000		137,7 16	7
		80000		0,272 1	6			80000		180,2 36	7
		100000		99,10 8	7			100000		223,5 6	7
		120000		110,3 66	7			120000		252,7 4	7
		140000		119,1 9	7			140000		294,0 4	7
		160000		136,1	7			160000		355,0 8	7
		180000		151,7 92	7			180000		408,9 2	7
		200000		167,7 46	7			200000		453,5 2	7
		220000		183,9 08	7			220000		494,0 2	7
		240000		198,6 56	7			240000		540,2 4	7
		260000		214,3 8	7			260000		598,4 4	7
	200	5000	Brazo Izquierdo	0,012 5	3		100	5000	Brazo Izquierdo	0,027 9	4
		7000		0,016 9	3			7000		0,039 1	4
		9000		0,021 4	3			9000		0,050 3	5
		11000		0,025 8	4			11000		0,061 4	5



	13000		0,030 2	4		13000		0,072 6	5
	15000		0,034 6	4		15000		0,083 8	5
	17000		0,039 4	4		17000		0,095 1	5
	19000		0,043 4	5		19000		0,106 1	6
	20000		0,045 6	5		20000		0,111 7	6
	40000		0,089 7	5		40000		0,223 4	6
	60000		0,133 8	6		60000		0,274 7	6
	80000		0,177 8	6		80000		102,6 8	7
	100000		0,221 9	6		100000		108,3 6	7
	120000		93,12 2	7		120000		128,8	7
	140000		101,8 9	7		140000		157,1	7
	160000		106,4 5	7		160000		175,7 9	7
	180000		116,5 6	7		180000		213,2 5	7
	200000		130,8	7		200000		212,6 4	7
	220000		144,8 7	7		220000		234	7
	240000		153,1 2	7		240000		255,4 4	7
	260000		167,5 5	7		260000		276,7 5	7
	5000	Brazo Derecho	0,012 5	3		5000	Brazo Derecho	0,014	3
	7000		0,016 9	3		7000		0,02	3
	9000		0,021 4	3		9000		0,026	4
	11000		0,025 8	4		11000		0,016	3
	13000		0,030 2	4		13000		0,037	4
	15000		0,034 6	4		15000		0,043	5
	17000		0,039 4	4		17000		0,049	5
	19000		0,043 4	5		19000		0,055	5



	20000		0,045 6	5		20000	0,058	5
	40000		0,089 7	5		40000	0,11	6
	60000		0,133 8	6		60000	0,16	6
	80000		0,177 8	6		80000	102,3	7
	100000		0,221 9	6		100000	108,1 3	7
	120000		93,21 3	7		120000	128,6 8	7
	140000		101,9 3	7		140000	156,3 7	7
	160000		106,4 4	7		160000	138,8 5	7
	180000		116,5 3	7		180000	193,2 8	7
	200000		130,8	7		200000	209,7 3	7
	220000		144,8 7	7		220000	212,4 4	7
	240000		153,1 2	7		240000	238,4 1	7
	260000		167,5 5	7		260000	257,3 3	7
	5000	Cabeza	0,012 5	3		5000	0,014 6	3
	7000		0,016 9	3		7000	0,02	3
	9000		0,021 4	3		9000	0,026	4
	11000		0,025 8	4		11000	0,032	4
	13000		0,030 2	4		13000	0,036	4
	15000		0,034 6	4		15000	0,042	5
	17000		0,039	4		17000	0,048	5
	19000		0,043 4	5		19000	0,054	5
	20000		0,045 6	5		20000	0,058	5
	40000		0,089 7	5		40000	0,116	6
	60000		0,133 8	6		60000	0,924	6



	80000	0,177 8	6		80000	102,4	7
	100000	0,221 9	6		100000	108,2 6	7
	120000	93,19 2	7		120000	128,2 8	7
	140000	101,9 08	7		140000	157,1	7
	160000	106,4 54	7		160000	175,5 4	7
	180000	116,6 14	7		180000	193,2 8	7
	200000	130,8 02	7		200000	209,7 2	7
	220000	143,8 56	7		220000	221,4	7
	240000	153,3 02	7		240000	238,5 4	7
	260000	167,4 2	7		260000	257,8 6	7



ANEXO 5

Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por el Brazo Izquierdo y los efectos fisiológicos producidos en las otras extremidades.

L1	L2	ICDA	EXT	IC_BI	IC_BD	IC_PI	IC_PD
340	50	5000	Brazo Izquierdo	5	1	4	4
		7000		5	1	3	4
		9000		5	1	5	5
		11000		5	1	4	4
		13000		6	1	5	5
		15000		6	1	5	5
		17000		6	1	5	5
		19000		3	1	6	6
		20000		6	1	6	6
		40000		7	1	7	7
		60000		7	1	7	7
		80000		7	1	7	7
		100000		7	1	7	7
		120000		7	1	7	7
		140000		7	1	7	7
		160000		7	1	7	7
		180000		7	1	7	7
		200000		7	1	7	7
		220000		7	1	7	7
		240000		7	1	7	7
	260000	7		1	7	7	
	100	5000		4	1	3	3
		7000		4	1	3	3
		9000		5	1	3	3
		11000		5	1	4	4
		13000		5	1	4	4
		15000		5	1	5	5
		17000		5	1	5	5
		19000		6	1	5	5
		20000		6	1	5	5
		40000		6	1	6	6
		60000		7	1	7	7
80000		7	1	7	7		
100000	7	1	7	7			
120000	7	1	7	7			
140000	7	1	7	7			
160000	7	1	7	7			



		180000	7	1	7	7
		200000	7	1	7	7
		220000	7	1	7	7
		240000	7	1	7	7
		260000	7	1	7	7
	150	5000	3	1	3	3
		7000	4	1	3	3
		9000	4	1	3	3
		11000	5	1	3	3
		13000	5	1	4	4
		15000	4	1	4	4
		17000	5	1	3	3
		19000	5	1	4	4
		20000	5	1	5	5
		40000	6	1	5	5
		60000	6	1	6	6
		80000	6	1	6	6
		100000	7	1	7	7
		120000	7	1	7	7
		140000	7	1	7	7
		160000	7	1	7	7
		180000	7	1	7	7
		200000	7	1	7	7
		220000	7	1	7	7
		240000	7	1	7	7
	260000	7	1	7	7	
	200	5000	3	1	2	2
		7000	3	1	2	2
		9000	3	1	3	3
		11000	4	1	3	3
		13000	4	1	3	3
		15000	4	1	3	3
		17000	4	1	3	3
		19000	5	1	3	3
		20000	5	1	3	3
		40000	5	1	5	5
		60000	6	1	5	5
		80000	6	1	5	5
		100000	6	1	6	6
		120000	7	1	7	7
		140000	7	1	7	7
	160000	7	1	7	7	
	180000	7	1	7	7	



	200000	7	1	7	7
	220000	7	1	7	7
	240000	7	1	7	7
	260000	7	1	7	7



ANEXO 6

Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por el Brazo Derecho y los efectos fisiológicos producidos en las otras extremidades.

L1	L2	ICDA	EXT	EFCA_BI	EFCA_BD	EFCA_PI	EFCA_PD
340	50	5000	Brazo Izquierdo	1	4	4	4
		7000		1	5	4	4
		9000		1	5	5	5
		11000		1	6	5	5
		13000		1	6	5	5
		15000		1	6	5	5
		17000		1	6	5	5
		19000		1	6	5	5
		20000		1	6	6	6
		40000		1	7	7	7
		60000		1	7	7	7
		80000		1	7	7	7
		100000		1	7	7	7
		120000		1	7	7	7
		140000		1	7	7	7
		160000		1	7	7	7
		180000		1	7	7	7
		200000		1	7	7	7
		220000		1	7	7	7
		240000		1	7	7	7
	260000	1	7	7	7		
	100	5000	1	3	3	3	
		7000	1	4	3	3	
		9000	1	5	3	3	
		11000	1	5	4	4	
		13000	1	5	4	4	
		15000	1	5	4	4	
		17000	1	5	5	5	
		19000	1	5	5	5	
		20000	1	5	5	5	
		40000	1	6	5	5	
		60000	1	6	6	6	
80000		1	7	7	7		
100000	1	7	7	7			
120000	1	7	7	7			
140000	1	7	7	7			
160000	1	7	7	7			



		180000	1	7	7	7
		200000	1	7	7	7
		220000	1	7	7	7
		240000	1	7	7	7
		260000	1	7	7	7
	150	5000	1	3	3	3
		7000	1	4	3	3
		9000	1	4	3	3
		11000	1	5	3	3
		13000	1	5	4	4
		15000	1	5	4	4
		17000	1	5	4	4
		19000	1	5	4	4
		20000	1	5	5	5
		40000	1	6	5	5
		60000	1	6	6	6
		80000	1	6	6	6
		100000	1	7	7	7
		120000	1	7	7	7
		140000	1	7	7	7
		160000	1	7	7	7
		180000	1	7	7	7
		200000	1	7	7	7
		220000	1	7	7	7
		240000	1	7	7	7
	260000	1	7	7	7	
	200	5000	1	3	2	2
		7000	1	3	2	2
		9000	1	3	3	3
		11000	1	4	3	3
		13000	1	4	3	3
		15000	1	4	3	3
		17000	1	4	3	3
		19000	1	5	3	3
		20000	1	5	3	3
		40000	1	5	5	5
		60000	1	6	5	5
		80000	1	6	5	5
		100000	1	6	6	6
		120000	1	7	7	7
		140000	1	7	7	7
	160000	1	7	7	7	
	180000	1	7	7	7	



	200000	1	7	7	7
	220000	1	7	7	7
	240000	1	7	7	7
	260000	1	7	7	7



ANEXO 7

Clasificación de los efectos fisiológicos que ingresa por la Cabeza y los efectos fisiológicos producidos en las otras extremidades.

L1	L2	ICDA	EXT	EFCA_C	EFCA_BI	EFCA_BD	EFCA_PI	EFCA_PD	
340	50	5000	Cabeza	5	1	1	4	4	
		7000		5	1	1	4	4	
		9000		5	1	1	5	5	
		11000		6	1	1	5	5	
		13000		6	1	1	5	5	
		15000		6	1	1	5	5	
		17000		6	1	1	5	5	
		19000		6	1	1	6	6	
		20000		6	1	1	6	6	
		40000		7	1	1	7	7	
		60000		7	1	1	7	7	
		80000		7	1	1	7	7	
		100000		7	1	1	7	7	
		120000		7	1	1	7	7	
		140000		7	1	1	7	7	
		160000		7	1	1	7	7	
		180000		7	1	1	7	7	
		200000		7	1	1	7	7	
		220000		7	1	1	7	7	
		240000		7	1	1	7	7	
	260000	7	1	1	7	7			
	100	5000			4	1	1	3	3
		7000			4	1	1	3	3
		9000			5	1	1	4	4
		11000			5	1	1	4	4
		13000			5	1	1	4	4
		15000			5	1	1	5	5
		17000			5	1	1	5	5
		19000			6	1	1	5	5
		20000			6	1	1	5	5
		40000			6	1	1	6	6
		60000			6	1	1	6	6
80000				7	1	1	7	7	
100000			7	1	1	7	7		
120000			7	1	1	7	7		
140000			7	1	1	7	7		
160000			7	1	1	7	7		



		180000	7	1	1	7	7
		200000	7	1	1	7	7
		220000	7	1	1	7	7
		240000	7	1	1	7	7
		260000	7	1	1	7	7
	150	5000	3	1	1	2	2
		7000	3	1	1	3	3
		9000	4	1	1	3	3
		11000	4	1	1	3	3
		13000	5	1	1	3	3
		15000	5	1	1	4	4
		17000	5	1	1	4	4
		19000	5	1	1	4	4
		20000	5	1	1	4	4
		40000	6	1	1	5	5
		60000	6	1	1	6	6
		80000	6	1	1	6	6
		100000	7	1	1	7	7
		120000	7	1	1	7	7
		140000	7	1	1	7	7
		160000	7	1	1	7	7
		180000	7	1	1	7	7
		200000	7	1	1	7	7
		220000	7	1	1	7	7
		240000	7	1	1	7	7
	260000	7	1	1	7	7	
	200	5000	3	1	1	2	2
		7000	3	1	1	2	2
		9000	3	1	1	3	3
		11000	4	1	1	3	3
		13000	4	1	1	3	3
		15000	4	1	1	3	3
		17000	4	1	1	3	3
		19000	5	1	1	3	3
		20000	5	1	1	3	3
		40000	5	1	1	5	5
		60000	6	1	1	5	5
		80000	6	1	1	5	5
		100000	6	1	1	6	6
		120000	7	1	1	7	7
		140000	7	1	1	7	7
	160000	7	1	1	7	7	
	180000	7	1	1	7	7	



	200000	7	1	1	7	7
	220000	7	1	1	7	7
	240000	7	1	1	7	7
	260000	7	1	1	7	7