

PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN  
ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS EPRI, PETERSON Y PEEK.

EDGAR FABIÁN MANTILLA TINOCO  
LUIS MAURICIO CALA ARIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2014

PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN  
ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS EPRI, PETERSON Y PEEK.

EDGAR FABIÁN MANTILLA TINOCO  
LUIS MAURICIO CALA ARIAS

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director  
JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO  
Ingeniero electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2014

## DEDICATORIA

*A Dios por su infinito amor y por todas las bendiciones que me ha dado.*

*A mi orgullo, mi madre Marlene Arias Flores, quien me ha enseñado que la vida se puede afrontar con una sonrisa, la que siempre ha estado conmigo apoyándome en las buenas y en las malas. Soy lo que soy gracias a ella.*

*A mi padre Carlos Julio Cala por su amor, su sacrificio, por sus consejos.*

*A mis hermanos Carlos Eduardo Cala y Silvia Juliana Cala por aguantarme y estar siempre conmigo.*

*A toda mi familia Arias Flores y Cala Pérez por estar pendientes de mi proceso de formación profesional y personal.*

*A mi amigo y compañero de proyecto de grado Edgar Fabián Mantilla por estar juntos en esta locura de realizar un proyecto de grado.*

*A mis amigos y compañeros, especialmente a los del garaje.*

*A mi amigo, a mi hermano Sergio Velandia Cáceres, él me ha demostrado que una amistad sincera se puede lograr.*

*Luis Mauricio Cala Arias*

## DEDICATORIA

*Tuyo es el poder, el honor y la gloria... Mi señor, mi Dios.*

*Detrás del triunfo de un hombre, hay siempre una innumerable cantidad de personas que hicieron su triunfo posible... En esta oportunidad, me es imposible nombrar a todas y cada una de aquellas personas que de una u otra manera me fortalecieron y ayudaron espiritual, física y académicamente. ¡Gracias!*

*A mi madre Fabiola Tinoco, ¿cuántos sacrificios, cuánta entrega?, mil gracias madre, por tus enseñanzas y paciencia, por tu amor... Por mi vida.*

*A mi padre Humberto Mantilla, hombre directo y correcto, símbolo de fortaleza y esmero. Gracias padre, por enseñarme a asumir mis responsabilidades, a tomar las riendas de mi destino, por compartir tu vida conmigo.*

*A mis hermanas, Diana, Laura y Valentina, tan diferentes y hermosas, la razón de mis mayores enojos, y de mis más inolvidables alegrías, las amaré por siempre.*

*A mi primo Jhonatan, compañero de la vida y hermano del alma.*

*A mi familia materna, mi abuela, mis tías y tíos, mis primos, consejeros y amigos, gracias por mostrarme el verdadero significado de una familia.*

*A mi gran amigo, el viejo Rafa, ejemplo de superación, mis respetos y admiración.*

*A mis amigos de la vida, Saily M., Estefanía T., Johanés G., Cristian G., Andrés T., gracias por su apoyo y compañía a lo largo de mi vida.*

*A mis compañeros y amigos de la UIS, el gran combo de estudio y ejercicio, Yuri, Carlos, Leidy, Ginny, Joan, Ana, Churco, Liceth, Sonia, Ray... Gracias por la amistad recibida y los momentos compartidos.*

*A mi amigo y compañero de proyecto de grado, mi parcerero. Gracias por emprender y culminar conmigo esta odisea, por su comprensión y paciencia en los buenos y malos días, siempre un gran apoyo.*

*A pepita, quien de una y otra manera me permitió cambiar y mejorar, como persona. Siempre en mis recuerdos, y en mi corazón.*

*Toda meta requiere de esfuerzo y dedicación, pero sobre todo, de motivación.*

*Edgar Fabián Mantilla Tinoco*

## AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero M.P.E. **Julio César Chacón Velasco** por su inmensa colaboración y asesoría en la realización del presente proyecto.

A los docentes de la **Universidad Industrial de Santander (UIS)** y de la **Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T)** por el conocimiento impartido a los largo de la carrera.

A nuestras **familias**, Cala Arias y Mantilla Tinoco, por el apoyo y la colaboración durante toda nuestra vida.

A nuestros **compañeros y amigos**, que de una u otra forma han estado presentes en los buenos y malos momentos, dentro y fuera de la universidad.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	21
1.1. EFECTO CORONA	21
1.2. MANIFESTACIONES DEL EFECTO CORONA	22
1.2.1 LUMINOSIDAD ENTORNO AL CONDUCTOR.	22
1.2.2 RUIDO AUDIBLE	23
1.2.3 PERTURBACIONES A FRECUENCIA DE RADIO Y TELEVISIÓN	23
1.2.4 GENERACIÓN DE OZONO	24
1.2.5 VIENTO IÓNICO	25
1.2.6 PÉRDIDAS DE ENERGÍA	25
1.3. TIPOS DE CORONA EN LOS CONDUCTORES	26
1.3.1 MODOS DE CORONA EN DC	26
1.3.2 CORONA POSITIVA	27
1.3.3 CORONA NEGATIVA	29
1.3.4 CORONA GLOW (CORONA RADIANTE)	31
1.3.5 CORONA STREAMER (CORONA SERPENTINA)	31
1.3.6 CORONA TRICHEL	32
1.3.7 CORONA BURST (CORONA DE RUPTURA)	32
1.3.8 CORONA PLUME (CORONA NUBE)	33
1.3.9 CORONA HERMSTEIN	33
1.4. FENÓMENOS QUE INFLUYEN EN EL EFECTO CORONA	33
1.4.1 GRADIENTE DE PEEK O DE INCEPCIÓN	34
1.4.2 GOTAS DE AGUA	37
1.4.3 DISCONTINUIDAD SUPERFICIAL	38
1.4.4 DENSIDAD DEL AIRE	39
1.4.5 HUMEDAD	39
1.5. PROCESO DE DESCARGA EN EL AIRE	40
1.6. PROCESOS FAVORABLES A LA DESCARGA	41
1.6.1 FOTOIONIZACIÓN	41
1.6.2 IONIZACIÓN POR CHOQUE	42
1.7. PROCESOS DESFAVORABLES A LA DESCARGA	43
1.7.1 RECOMBINACIÓN	43
1.7.2 ENLACE CON MOLÉCULA NEUTRA	43
1.8. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS	44

1.9. PROCESO DE AVALANCHA DE TOWNSEND	44
1.9.1 DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO DE AVALANCHA	45
2. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	48
2.1. MÉTODO DE PEEK	49
2.2. MÉTODO DE PETERSON	53
2.3. MÉTODO DE EPRI	58
3. PROGRAMA PARA REALIZAR LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA CON LOS MÉTODOS EPRI, PETERSON Y PEEK.	67
4. APLICACIÓN DE LAS 3 METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA ESTIMAR LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A ALTAS TENSIONES.	69
4.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN 1	69
4.1.1 MÉTODO PEEK	70
4.1.2 MÉTODO PETERSON	72
4.1.3 MÉTODO EPRI	73
4.2. LÍNEA DE TRANSMISIÓN 2	75
4.2.1. MÉTODO PEEK	76
4.2.2. MÉTODO PETERSON	76
4.2.3. MÉTODO EPRI	77
4.3. LÍNEA DE TRANSMISIÓN 3	77
4.3.1. MÉTODO PEEK	78
4.3.2. MÉTODO PETERSON	78
4.3.3. MÉTODO EPRI	79
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	80
5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGÚN LA CONDICIÓN CLIMÁTICA	80
5.1.1 PÉRDIDAS POR CORONA PARA MAL CLIMA O EN AMBIENTE DE LLUVIA	81
5.1.2 PÉRDIDAS POR CORONA PARA BUEN CLIMA O EN AMBIENTE SECO	83
5.1.3 PÉRDIDAS POR CORONA PARA BUEN CLIMA O EN AMBIENTE SECO	83
5.2. ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN COMPARACIÓN A LA POTENCIA TRANSMITIDA	85

5.3. ANÁLISIS DE LOS FACTORES “M” EN LA ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LA METODOLOGÍA PEEK Y PETERSON	86
5.3.1. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA PEEK.	87
5.3.2. ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA PETERSON.	91
6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS METODOLOGÍAS EPRI, PETERSON Y PEEK	95
7. CONCLUSIONES	99
8. RECOMENDACIONES	102
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	104
BIBLIOGRAFÍA	106

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ecuaciones según la configuración de cilindros y conductores.....	36
<b>Tabla 2.</b> Valores para el factor ambiental $m_t$ .....	37
<b>Tabla 3.</b> Valores para el factor de superficie $m_c$ .....	38
<b>Tabla 4.</b> Valores de $m_s$ para el estado de la superficie del conductor.....	56
<b>Tabla 5.</b> Valores de $m_f$ según la forma del conductor .....	57
<b>Tabla 6.</b> Valores del coeficiente $\phi$ obtenidos de la figura 8.....	57
<b>Tabla 7.</b> Resultados de las investigaciones adaptadas a las condiciones de Bucaramanga .....	64
<b>Tabla 8.</b> Resultados de las investigaciones adaptadas a las condiciones del laboratorio de A.T UIS.....	65
<b>Tabla 9.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método Peek.....	74
<b>Tabla 10.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método Peterson.....	75
<b>Tabla 11.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método EPRI. ....	75
<b>Tabla 12.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método Peek.....	76
<b>Tabla 13.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método Peterson.....	76
<b>Tabla 14.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método EPRI. ....	77
<b>Tabla 15.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método Peek.....	78
<b>Tabla 16.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método Peterson.....	78

<b>Tabla 17.</b> Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método EPRI. ....	79
<b>Tabla 18.</b> Resultados de las pérdidas por efecto corona de la línea de transmisión de 115 kV.....	80
<b>Tabla 19.</b> Resultados de las pérdidas por efecto corona de la línea de transmisión de 230 kV.....	81
<b>Tabla 20.</b> Resultados de las pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV.....	81
<b>Tabla 21.</b> Resultados de las pérdidas por efecto corona en porcentaje en la línea de transmisión de 115 kV.....	85
<b>Tabla 22.</b> Resultados de las pérdidas por efecto corona en porcentaje en la línea de transmisión de 230 kV.....	85
<b>Tabla 23.</b> Resultados de las pérdidas por efecto corona en porcentaje en la línea de transmisión de 500 kV.....	86
<b>Tabla 24.</b> Variación del factor ambiental $m_t$ en la estimación del efecto corona para 115 kV.....	87
<b>Tabla 25.</b> Resultados de estimar el efecto corona variando $m_c$ a la línea de transmisión de 115 kV.....	88
<b>Tabla 26.</b> Resultados de variar $m_t$ para estimar las pérdidas por efecto corona en 230 kV. ....	88
<b>Tabla 27.</b> Variación del factor superficial $m_c$ para estimar las pérdidas por efecto corona en 230 kV. ....	89
<b>Tabla 28.</b> Resultados de variar el factor $m_s$ en la estimación de las pérdidas por efecto corona. ....	91
<b>Tabla 29.</b> Resultados de variar el factor $m_s$ en la estimación de las pérdidas por efecto corona. ....	92
<b>Tabla 30.</b> Resultados de variar el factor $m_s$ en la estimación de las pérdidas por efecto corona. ....	93
<b>Tabla 31.</b> Parámetros requeridos por los métodos EPRI, Peterson y Peek. ....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Efecto de la ionización del aire.....	22
<b>Figura 2.</b> Diferencia visual entre corona positiva y negativa.....	27
<b>Figura 3.</b> Proceso de descarga por corona positiva.....	28
<b>Figura 4.</b> Proceso de descarga por corona negativa.....	30
<b>Figura 5.</b> Cilindros concéntricos.....	35
<b>Figura 6.</b> Conductores paralelos.....	35
<b>Figura 7.</b> Conductor paralelo a plano.....	36
<b>Figura 8.</b> Función de Peterson para el cálculo de efecto corona.....	57
<b>Figura 9.</b> Continuación de la función de Peterson para la estimación del factor $\varphi$ .....	58
<b>Figura 10.</b> Configuración coaxial equivalente a una línea de transmisión.....	59
<b>Figura 11.</b> Esquema del método de las imágenes para el cálculo de los coeficientes de potencial.....	61
<b>Figura 12.</b> Diagrama de flujo del programa E_corona.....	68
<b>Figura 13.</b> Comportamiento del factor $m_t$ en la estimación del efecto corona para 115 kV. .....	87
<b>Figura 14.</b> Variación del efecto corona respecto a $m_t$ .....	89
<b>Figura 15.</b> Variación del efecto corona respecto a $m_c$ .....	90
<b>Figura 16.</b> Comportamiento de $m_s$ en la estimación del efecto corona.....	92
<b>Figura 17.</b> Comportamiento de $m_s$ en la estimación del efecto corona.....	93
<b>Figura 18.</b> Comportamiento de $m_s$ en la estimación del efecto corona.....	94

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Manual de usuario de E_corona.....	107
<b>Anexo B.</b> Lenguaje de Programación de E_corona .....	107
<b>Anexo C.</b> Artículo.....	107

## RESUMEN

**TITULO: PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS EPRI, PETERSON Y PEEK\*.**

**AUTORES:** Edgar Fabián Mantilla Tinoco  
Luis Mauricio Cala Arias\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Efecto corona, método EPRI, método Peterson, método Peek, líneas de transmisión, alta tensión, pérdidas, comparación de los métodos.

**DESCRIPCIÓN:** Debido a la importancia que tienen las líneas de transmisión en la industria eléctrica, existen varios factores a considerar en su diseño y planeación antes de que éstas sean puestas en servicio, y uno de los fenómenos más frecuentes en las líneas de alta tensión es el llamado efecto corona.

A pesar que existen una gran cantidad de métodos que permiten realizar cálculos de pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión en alta tensión, cada uno con sus ventajas y desventajas; son en la actualidad los métodos de Peek y Peterson los empleados con mayor frecuencia tanto en la industria como en la academia.

En el presente proyecto, se tiene como objeto realizar una descripción del fenómeno corona y de los métodos Peterson, Peek y EPRI para posteriormente y tomando tres configuraciones reales como base, mostrar las ventajas y desventajas presentadas por cada uno de ellos.

De forma paralela se realizará un programa en computador que permita realizar las estimaciones pertinentes para el cálculo de las pérdidas por efecto corona con base en los métodos ya descritos, para una línea de transmisión de alta tensión.

Además, se presentará y buscará la publicación de un artículo donde se evidencien los resultados obtenidos del presente trabajo.

---

\* Proyecto de grado: Trabajo de investigación

\*\* Facultad de ingenierías físico – mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.  
Director: Julio César Chacón Velasco

## SUMMARY

**TITLE: CORONA LOSSES IN TRANSMISSION LINES IN HIGH VOLTAGE. COMPARISON OF METHODS EPRI, PETERSON AND PEEK\*.**

**AUTHORS:** Edgar Fabián Mantilla Tinoco  
Luis Mauricio Cala Arias\*\*.

**KEYWORDS:** Effect corona, EPRI method, Peterson method, Peek method, transmission lines, high voltage, losses, comparison of methods.

**DESCRIPTION:** Due to the importance of transmission lines in the electrical industry, there are several factors to consider in the design and planning before they are put into service, and one of the most common phenomena in high-voltage lines is called corona.

Although there are a lot of methods to perform calculations corona losses in transmission lines at high voltage, each with its advantages and disadvantages; are currently Peek methods and Peterson the most frequently used in both industry and academia.

In this project, is to obtain a description of the corona phenomenon and Peterson, Peek and EPRI and later taking three methods and actual configurations as a basis, show the advantages and disadvantages presented by each.

Parallel computer a program that allows for the relevant estimates for calculating corona losses based on the methods already described, for a line of high voltage transmission is performed.

It was also presented and seek publication of an article in which the results of this study are evident.

---

\* Degree proyecty: Research paper

\*\* Physics and Mechanics Engineering Faculty. Electric, Electronics and Telecommunications Engineering. Director: Julio César Chacón Velasco, M.P.E.

## INTRODUCCIÓN

El sector energético es uno de los pilares del desarrollo de todos los países, convirtiéndose así la energía eléctrica en parte importante del desarrollo económico, social y tecnológico de toda nación.

Las bases de la energía eléctrica se forjaron a partir de 1831, año en el que el científico inglés Michael Faraday descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética. Descubrimiento que posteriormente dio origen a profundas investigaciones sobre la interacción de conductores de corriente eléctrica con los campos electromagnéticos, posibilitando así la creación de generadores eléctricos, originando así el principio de todo Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

En la actualidad, un Sistema eléctrico de potencia está conformado básicamente por un conjunto de centrales generadoras, de líneas de transmisión interconectadas entre sí, y de sistemas de distribución.

Debido a la importancia que tienen las líneas de transmisión en la industria eléctrica, existen varios factores a considerar en su diseño y planeación antes de que éstas sean puestas en servicio. Uno de los fenómenos más frecuentes en las líneas de alta tensión es el llamado efecto corona, el cual es producto de la acumulación de cargas en las regiones de un conductor cargado, generando un campo eléctrico muy intenso, capaz de ocasionar la ruptura dieléctrica del aire en las inmediaciones de las regiones.

La corona se debe principalmente a la ionización del aire, proceso mediante el cual se originan iones producto de la colisión de los iones que son atraídos y repelidos por el conductor a grandes velocidades. Esto ocasiona que el aire se comporte como un conductor, aumentando el diámetro eficaz del conductor metálico.

En las líneas de transmisión se pueden observar pérdidas de energía y corrosión en los conductores, lo cual conlleva también a la degradación de los aisladores, ruido audible, interferencia electromagnética y aumento del riesgo a futuras fallas. Esto debido principalmente al fenómeno conocido como efecto corona. De allí surge la necesidad y la importancia de poder medir y hacer una efectiva detección de la magnitud del efecto en determinada zona y línea de transmisión.

A pesar que existe una gran cantidad de métodos que permiten realizar cálculos de pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión en alta tensión, cada uno con sus ventajas y desventajas; son en la actualidad los métodos de Peek y Peterson los empleados con mayor frecuencia tanto en la industria como en la academia, quizá porque sus restricciones y limitaciones son menores en comparación con los demás, o simplemente porque son los métodos más explicados y aplicados en textos guías.

A estos dos métodos ampliamente conocidos y aplicados, se adiciona el método expuesto y parametrizado por el Electric Power Research Institute (EPRI), los cuales serán contextualizados, explicados y aplicados.

## 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

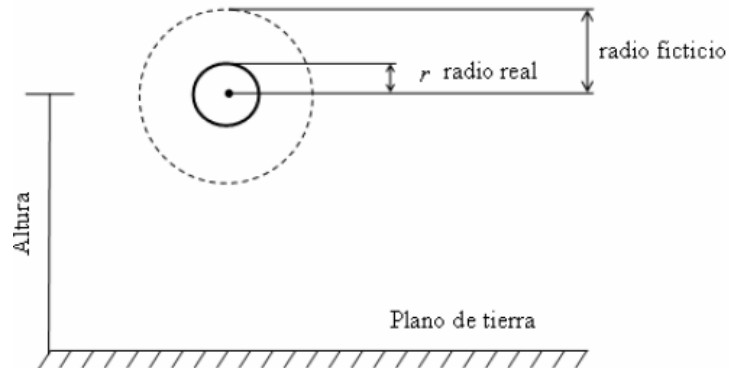
### 1.1. EFECTO CORONA

El efecto corona es un fenómeno que se presenta cuando el potencial de un conductor genera una intensidad de campo igual o superior a la rigidez dieléctrica del medio gaseoso que lo circunda, lo cual en una línea de transmisión aérea corresponde al aire.

El aire es el aislante por naturaleza entre los conductores y junto a las cadenas de aisladores, el más importante en las líneas de transmisión aéreas. Cuando el potencial del conductor supera su rigidez dieléctrica, éste se ioniza, es decir que aquellos iones libres en el aire que son generados por radiación cósmica o radioactiva, se ven afectados por el efecto de la intensidad del campo producido por el conductor energizado. Cuando el campo eléctrico es alterno y según sea la polaridad de su semiciclo, se produce la atracción y repulsión de las partículas ionizadas y las neutras con respecto a la fuente del campo eléctrico. Este movimiento de atracción y repulsión es lo que permite la “ionización por impacto”, que dicho en otras palabras es cuando las partículas adquieren la energía cinética necesaria para ionizar por colisión a otras partículas neutras.

El aire ionizado alrededor del conductor, permite la conducción de partículas, creando un efecto de “conductor ficticio”, lo cual como se muestra en la figura 1. Se puede analizar como un aumento en el diámetro del conductor real.

**Figura 1.** Efecto de la ionización del aire.



**Fuente:** Tesis de grado: Análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en C.A. [2]

## 1.2. MANIFESTACIONES DEL EFECTO CORONA

El efecto corona se puede evidenciar y manifestar a través de varios fenómenos congruentes, los cuales son: [3][8]

- ❖ Luminosidad entorno al conductor.
- ❖ Ruido audible.
- ❖ Perturbaciones a frecuencias de radio y televisión.
- ❖ Generación de ozono.
- ❖ Viento iónico.
- ❖ Pérdidas de energía.

**1.2.1 Luminosidad entorno al conductor.** El proceso de atracción y repulsión dota a las partículas de gran velocidad; cuando éstas logran alejarse del conductor tanto como para no ser atraídas nuevamente, son “frenadas” en diferenciales muy pequeños de distancia por el aire, que al no ser conductor sino más bien un aislador natural, obstaculiza e impide a los iones seguir con su trayectoria. Estos iones pasan de grandes velocidades a velocidades nulas, esto es posible debido a que su energía cinética se ve disminuida por la fricción, y al ser este cambio tan rápido,

se supone una fricción muy grande, provocando así un aumento de temperatura en los iones, lo cual los lleva a un estado incandescente.

Dicho estado incandescente propio de cada uno de los millones de electrones libres se puede observar como un anillo luminoso en torno al conductor. Dado que los conductores tienen forma cilíndrica y el anillo luminoso sigue las líneas de tensión asociadas al conductor a lo largo de la línea (gradiente de tensión), aparecerá un haz luminoso con forma de anillo o corona alrededor de toda la línea. Según sea la intensidad del campo eléctrico, se produce un brillo repentino, y su color será el mismo color de la corona alrededor del conductor a lo largo de la línea, siendo un color rojizo cuando el efecto no es muy significativo (menor temperatura) y un color blanco o azulado cuando el efecto es muy significativo (mayor temperatura).

Este efecto puede llegar a ser visible desde grandes distancias en noches muy oscuras.

**1.2.2 Ruido audible** La percepción de este efecto se ve influenciada por las condiciones climáticas del entorno de las líneas, presentando una mayor intensidad bajo fuerte lluvia, una intensidad media en condiciones de lloviznas o neblina, y una menor intensidad en clima seco.

**1.2.3 Perturbaciones a frecuencia de radio y televisión** Las denominadas interferencias radio-televisión son perturbaciones provocadas por campos electromagnéticos de altas frecuencias que irradian desde los conductores y aisladores. Estos campos electromagnéticos son generados por corrientes de alta frecuencia, las cuales son transmitidas por los transformadores o conducidas por el conductor neutro, hasta alcanzar algún receptor de radio o televisión.

Las perturbaciones de una línea de alta tensión son caracterizadas en primera instancia por los siguientes parámetros:

- Variación en función de la frecuencia.
- El gradiente eléctrico en la superficie de los conductores.
- El estado de la superficie de los conductores.
- La posición en el espacio.
- La dimensión de la línea.
- Las condiciones climáticas.

**1.2.4 Generación de ozono** El ozono es un compuesto molecular formado por 3 moléculas de Oxígeno ( $O_3$ ), y producido permanentemente de forma natural, a través de las radiaciones ultravioletas emitidas por el sol, la descomposición de productos naturales, entre otros.

El ozono es un estado alotrópico del oxígeno, con un alto grado de inestabilidad, pues de forma espontánea tiende a descomponerse en  $O_2$ , y cuya concentración natural es de 3 partes por 100 millones en volumen a la altura del mar, y a 3,6 partes por 100 millones en volumen a una altura de 2000 metros sobre el nivel del mar (msnm).

En términos de alta tensión, a condiciones de laboratorio se ha determinado que por cada kW/h disipado por efecto corona, se producen entre 0,5 y 5 g de ozono. Variando dichos valores en función de las condiciones climáticas y meteorológicas, siendo menor la producción en días secos y mayor durante condiciones de lluvia.

Dado que el ozono es un oxidante muy activo y bajo ciertas condiciones puede llegar a ser tóxico para los seres vivos, las normas internacionales limitan la má-

xima concentración de ozono a 10 partes por 100 millones en volumen, para jornadas inferiores de 8 horas.

Según cálculos y medidas realizadas cerca de las líneas de transmisión, los incrementos locales en los niveles del gas por el efecto corona resultan insignificantes. Su nivel de concentración bajo las líneas de alta tensión es aproximadamente 20 veces inferior al admitido por normas internacionales. Siendo cerca del 90% de los oxidantes ozono, y el 10% restante óxidos de nitrógeno.

**1.2.5 Viento iónico** El viento iónico se produce cuando los iones creados por las descargas de corona son acelerados por el campo eléctrico. La velocidad con la cual son acelerados es transferida a las moléculas del gas ambiente por medio de colisiones, proporcionando un movimiento de la punta hacia el medio del gas.

La velocidad de los iones aumenta a medida que aumenta su energía cinética; dicha energía se genera debido al choque elástico que se produce entre los iones libres, los cuales se desplazan debido al campo eléctrico que se le aplica a un gas (en sentido opuesto al campo aplicado) y las moléculas propias del gas.

**1.2.6 Pérdidas de energía** Al presentarse el efecto corona y producirse la ionización del aire, se producen fenómenos como la luminosidad en torno al conductor, el ruido audible, las perturbaciones, la generación de ozono y el viento iónico entre otros, cada uno en mayor o menor proporción según las condiciones generales.

Para que se pueda presentar cada uno de estos fenómenos, se requiere de una cantidad mínima de energía, la cual proviene de una misma fuente, y es de la energía transmitida a través de los conductores de las líneas. Bajo condiciones de tensiones mínimas, de diámetros y espaciamientos de conductores, y de condiciones meteorológicas o atmosféricas, ésta energía puede llegar a alcanzar valores

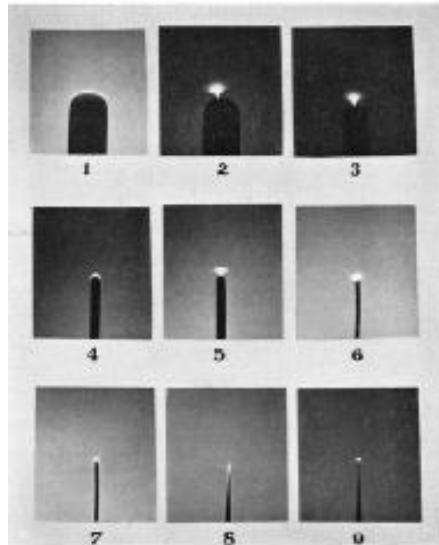
tan grandes como para ser considerados en los diseños y operaciones de las líneas. Dichas pérdidas pueden ser controladas y mitigadas realizando un buen diseño, basado en análisis y cálculos adecuados. Actualmente diferentes métodos y programas permiten calcular y simular una línea de transmisión, para así conocer y mitigar las pérdidas por corona.

### **1.3. TIPOS DE CORONA EN LOS CONDUCTORES**

**1.3.1 Modos de corona en dc** Las descargas parciales de los electrodos positivos y negativos determinan el modo corona según sea su polaridad. Sin embargo, aún para una misma polaridad, la corona puede manifestarse en una o más formas en función de la tensión aplicada, la forma del electrodo, y las condiciones de la superficie. Cada modo de corona tiene sus propias características, con pulsos cuya magnitud y frecuencia varían.

En vista de su polaridad, existe la corona positiva y la corona negativa. Su polaridad puede ser determinada de forma visual dada la tensión aplicada al electrodo de corona, en la figura 2, se puede observar que la corona positiva aparece como resplandor inmóvil, difuso sobre el extremo de un conductor (subfiguras 1, 4 y 7), mientras que la corona negativa se visualiza como un punto minúsculo localizado en el extremo del conductor, el cual se extiende hacia afuera del conductor, ampliando su rango de luminosidad (subfiguras 2, 3, 5, 6, 8 y 9) [1][3].

**Figura 2.** Diferencia visual entre corona positiva y negativa.



**Fuente:** Tesis de grado: Efecto corona en líneas de transmisión de 500 kV. [3]

**1.3.2 Corona positiva** La corona positiva es un proceso que se origina mediante la ionización del entorno que rodea al electrodo. Dicho proceso tiene unas características específicas, las cuales se describen y observan en la figura 3. En dicha figura, un potencial positivo de gran valor se aplica al electrodo de corona, mientras que el electrodo colector se pone a tierra o se fija a un potencial relativamente pequeño, logrando que el entorno cercano a los electrodos sea influenciado por el campo eléctrico, lo cual hace que los electrones libres sean atraídos y acelerados hacia el electrodo de corona.

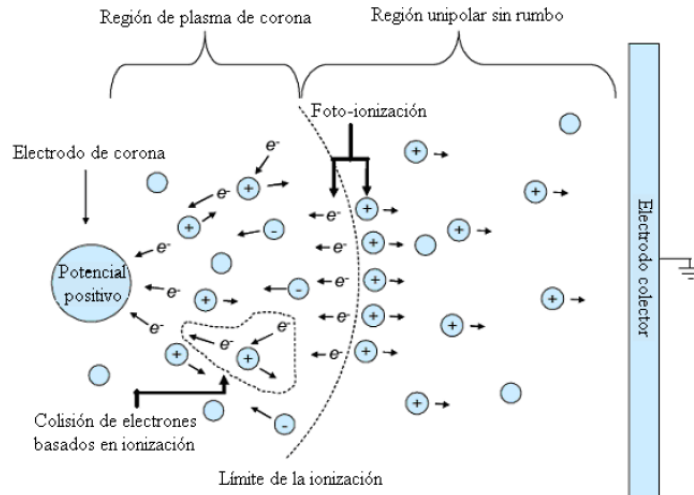
La región del plasma de corona, debido a que la intensidad del campo eléctrico es mayor, los micrones<sup>1</sup> de la superficie del electrodo de corona alcanzan un nivel crítico. Esto origina una región en la cual existe un campo crítico, donde las colisiones entre electrones y las moléculas del aire originan más electrones. Este pro-

---

<sup>1</sup> Partícula diminuta cuya longitud representa la milésima porción del milímetro.

ceso genera los electrones libres y los iones positivos que son atraídos y acelerados de forma alterna, por las fuerzas de Coulomb.

**Figura 3.** Proceso de descarga por corona positiva.



**Fuente:** Tesis de grado: Efecto corona en líneas de transmisión de 500 kV. [3]

Otra forma de generar electrones e iones libres es mediante la fotoionización. Los fotones se emiten de los electrones, mientras que decaen en niveles de energía más bajos en la región del plasma. En aire seco,  $O_2^+$  y  $N_2^+$  son los portadores principales de la carga.

La región de ionización de corona positiva se caracteriza por un resplandor uniforme, azulado púrpura y algo débil.

Fuera de la región del plasma de corona, la fuerza del campo es escasa para producir pares inducidos por colisiones entre electrones e iones. En dicha área, existen solamente iones de la misma polaridad que el electrodo de corona. Los iones unipolares (iones de una sola polaridad) se desplazan desde el borde de la región

de corona hacía el electrodo del colector. Cualquier ion negativo restante dentro de la región de corona será atraído hacia el electrodo de corona.

En pocas palabras, el proceso de corona positiva está caracterizado por una tensión muy alta aplicada en el electrodo de corona, la cual genera un campo eléctrico muy fuerte. Dicho campo posee una alta intensidad, que permite la ionización de las moléculas en el ion positivo con pares de electrones del aire. Mientras se mueven, bombardean otras moléculas neutras y las logran descomponer en más electrones y en iones positivos. Todos los iones positivos son repelidos por el electrodo corona hacía el electrodo colector. [3] [7]

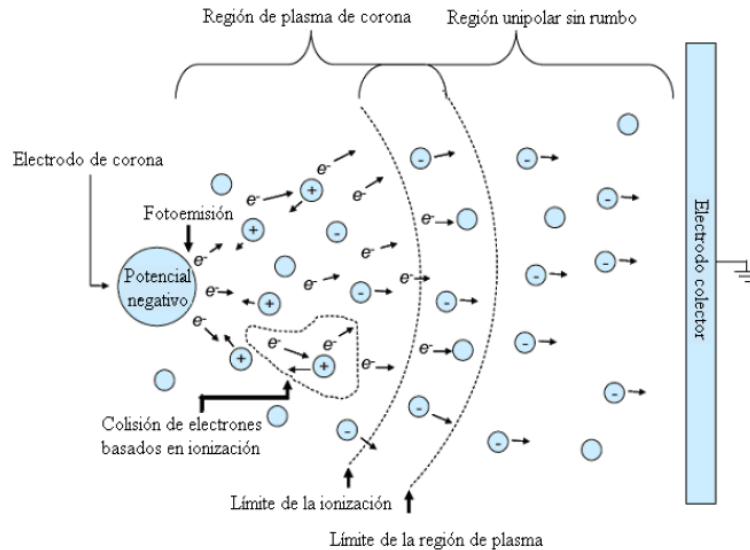
**1.3.3 Corona negativa** La corona negativa es un proceso que se origina mediante la ionización del entorno que rodea al electrodo. Este proceso tiene unas características específicas, las cuales se describen y observan en la figura 4. En dicha figura, un potencial negativo de gran valor se aplica al electrodo de corona mientras que el electrodo colector se pone a tierra o se fija a un potencial relativamente pequeño.

Semejante al panorama de la corona positiva, los electrones en el aire inician el proceso de avalancha del electrón; los electrones secundarios en la corona negativa son producidos principalmente por fotoemisión<sup>2</sup> en la superficie del electrodo de corona. La producción de electrones por fotoemisión depende parcialmente de emparejar la energía de fotones emitidos a la función de trabajo del material del electrodo de corona.

---

<sup>2</sup> Se produce cuando un material de tipo semiconductor dopado con ciertas impurezas emite luz al paso de una corriente eléctrica.

**Figura 4.** Proceso de descarga por corona negativa.



**Fuente:** Tesis de grado: Efecto corona en líneas de transmisión de 500 kV. [3]

En la región de ionización, la producción de electrones libres por colisiones del electrón con las moléculas del aire es mayor a la presentada en el proceso de corona positiva.

Contrario al proceso de corona positiva, los electrones son acelerados hacia afuera de la región de ionización, donde bombardean otras moléculas neutrales presentes en el aire. Debido al bombardeo se pueden producir reacciones químicas, que aumentan la magnitud de la generación de ozono, en relación a los generados en la corona positiva. La corona negativa se visualiza como descargas azuladas púrpuras, las cuales se hacen discontinuas a lo largo del electrodo y se presentan únicamente en gases electronegativos, tales como el oxígeno, vapor de agua y bióxido de carbono. Una corona negativa no se presentará en gases puros, tales como el nitrógeno, hidrógeno, helio y argón.

En pocas palabras, el proceso de corona negativo se presenta debido a una alta intensidad del campo eléctrico presente alrededor del electrodo de corona, y aplicando una tensión de polaridad negativa al electrodo. Los iones positivos son atraídos al electrodo de corona, mientras que los electrones se repelan hacia el electrodo de colector.

Dentro de los dos tipos de corona (positiva y negativa) se encuentran diversas formas de manifestación, las cuales se describen en las subcategorías siguientes [3] [7].

**1.3.4 Corona glow (corona radiante)** Su principal característica es que presenta una gran estabilidad, acompañada con una luminosidad constante. Su presencia en los sistemas comerciales de transmisión es bastante inusual.

Las pérdidas que ésta manifestación de corona puede ocasionar son de magnitudes considerables, caso contrario a la interferencia sobre las comunicaciones inalámbricas, donde adquiere valores casi nulos.

La corona glow se puede presentar tanto para la corona positiva como para la negativa.

**1.3.5 Corona streamer (corona serpentina)** Es una descarga observada únicamente para valores de tensión superiores a los valores de inyección. Se caracteriza por ser una descarga repetitiva, resaltada por un filamento luminoso que se extiende hasta la región de baja intensidad del campo.

La magnitud del streamer aumenta de forma directa, al aumentar el gradiente eléctrico. El streamer es caracterizado por un haz luminoso de color azul, el cual de-

genera posteriormente en la descarga disruptiva. Esta se identifica gracias al filamento azul que logra extenderse entre el espacio interelectrónico, alejándose bastante del electrodo de partida.

La descarga denota una intensidad de corriente con una amplitud promedio de 100 mA, con una corta duración y una tasa de repetición del orden de varios kHz.

La corona streamer se puede presentar tanto para la corona positiva como para la negativa, siendo en ambos casos igual de importantes tanto las pérdidas, como el efecto sobre la radiointerferencia.

**1.3.6 Corona trichel** Es una descarga observada para valores de tensión aplicada iguales o ligeramente superiores a los de tensión de inyección. Se caracteriza por ser la primera forma de corona que se observa durante las pruebas. Su apariencia es la de un abanico purpúreo que se mueve de forma constante, con una amplitud de corriente de aproximadamente 10 mA, una frecuencia que oscila entre 10 y 100 kHz (tasa de repetición) y una muy corta duración (inferior a 10 ns).

Las pérdidas causadas por esta forma de corona, al igual que su radiointerferencia, suelen ser despreciables debido a que sus valores son casi nulos.

La corona trichel es un tipo de descarga muy frecuente, presentada únicamente en polaridad negativa.

**1.3.7 Corona burst (corona de ruptura)** Es una descarga observada para valores de tensión aplicada iguales o ligeramente superiores a los de tensión de inyección. Se le considera como el inicio de un glow positivo, motivo por el cual se presenta únicamente en la polaridad positiva.

Se caracteriza por estar fuertemente adherida a la superficie del conductor, como un terciopelo de color azulado. Los impulsos de corriente mostrados en el oscilos-

copio son de poca amplitud y larga duración (fracciones en el orden de los milisegundos).

La corona Burst presenta valores de pérdidas y de radiointerferencia casi nulos, razón por la cual suelen ser despreciables.

**1.3.8 Corona plume (corona nube)** Se le conoce así a los streamers (corona serpentina) generados únicamente en la polaridad positiva. Su aparición se presenta en forma múltiple y constante.

Su principal característica es la luminosidad observada en las gotas de agua que están presentes en la superficie del conductor.

**1.3.9 Corona hermsstein** Este tipo de descarga ocurre con poca frecuencia y difícilmente se logra observar en la práctica. Se caracteriza por presentar grandes valores por pérdidas, pero pocos valores por radiointerferencia. La corona hermsstein se presenta únicamente en polaridad positiva.

#### **1.4. FENÓMENOS QUE INFLUYEN EN EL EFECTO CORONA**

El efecto corona, a pesar de ser un fenómeno que se presenta de forma independiente, está determinado y se ve influenciado directamente por los siguientes fenómenos: [2][3][8]

- Gradiente de Peek o de inyección.
- Gotas de agua.
- Discontinuidad superficial.
- Densidad del aire.
- Humedad.

**1.4.1 Gradiente de Peek o de inyección** El cálculo del gradiente eléctrico en la superficie del conductor, en particular el denominado gradiente crítico o de inyección “ $E_c$ ”, es uno de los elementos primordiales para determinar si un conductor entra en corona, su importancia radica en el cálculo de pérdidas por corona, ruido audible, así como para determinar los niveles de radiointerferencia que se generan debido a dicho fenómeno.

El cálculo del gradiente eléctrico es bastante complejo, dado que es necesario considerar la presencia de todas las fases, la de los equipos y las estructuras próximas al conductor, al igual que la cercanía de la tierra y otros objetos a tierra.

La fórmula más difundida es, sin lugar a dudas la de F.W Peek, la cual data del año 1920 y permite el cálculo del gradiente en un conductor cilíndrico. Dicha fórmula, obtenida de forma empírica, es función del diámetro del conductor, la condición de la superficie, la polaridad (en el caso DC), además de factores ambientales como la presión atmosférica y la temperatura.

$$E_c = mE_0\delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}}\right) \left[\frac{kVrms}{cm}\right] \quad (1)$$

Donde para CA:

$E_0$  Es la rigidez dieléctrica, con un valor usual de 29,8 kV/cm (valor pico), o 21,1 kV/cm (valor eficaz rms).

K es una constante empírica dada por:

0,301 para el caso de dos conductores paralelos sobre tierra.

0,308 para una geometría cilíndrica concéntrica.

m es un factor de irregularidad de la superficie del conductor<sup>3</sup>

r es el radio del conductor en cm.

$\delta$  Es la densidad relativa del aire, la cual está dada por:

---

<sup>3</sup> El factor de irregularidad de la superficie del conductor se descompone en 2 factores:  $m_t$  y  $m_c$ , siendo  $m_t$  el factor ambiental o meteorológico y  $m_c$  el coeficiente de rugosidad del conductor.

$$\delta = \frac{3,855 \cdot h}{273 + \theta} \quad (2)$$

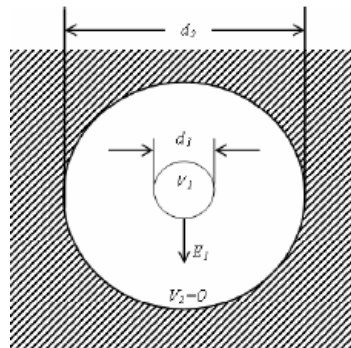
Dónde:

$\theta$  es la temperatura [°C].

$h$  es la presión del aire [cm de Hg].

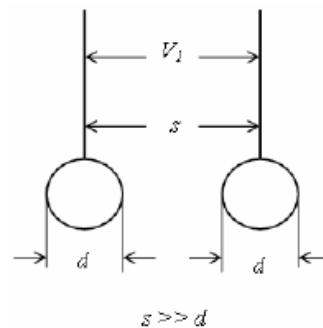
A continuación, en la tabla 1 se presentan las fórmulas necesarias para el cálculo del gradiente de inyección en los arreglos mostrados en las figuras 5, 6 y 7.

**Figura 5.** Cilindros concéntricos.



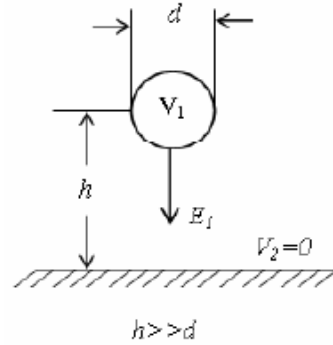
**Fuente:** Tesis de grado: Análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en CA. [2]

**Figura 6.** Conductores paralelos.



**Fuente:** Tesis de grado: Análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en CA. [2]

**Figura 7.** Conductor paralelo a plano.



**Fuente:** Tesis de grado: Análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en CA. [2]

**Tabla 1.** Ecuaciones según la configuración de cilindros y conductores.

Cilindros concéntricos figura 5	Conductores paralelos figura 6	Conductor paralelo al plano figura 7
$E_1 = \frac{2V_1}{d_1 * \text{Ln}\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$	$E_1 = \frac{V_1}{d * \text{Ln}\left(\frac{2S}{d}\right)}$	$E_1 = \frac{2V_1}{d * \text{Ln}\left(\frac{4h}{d}\right)}$
$C = \frac{55,6x10^{-12}}{\text{Ln}\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$	$C = \frac{27,8x10^{-12}}{\text{Ln}\left(\frac{2S}{d}\right)}$	$C = \frac{55,6x10^{-12}}{\text{Ln}\left(\frac{4h}{d}\right)}$
$E_c = 31m\delta \left(1 + \frac{0,431}{\sqrt{\delta d_1}}\right)$	$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0,426}{\sqrt{\delta d}}\right)$	$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0,426}{\sqrt{\delta d}}\right)$
$V_c = E_c \left(\frac{d_1}{2}\right) \text{Ln}\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$	$V_c = E_c d \text{Ln}\left(\frac{2S}{d}\right)$	$V_c = E_c \left(\frac{d}{2}\right) \text{Ln}\left(\frac{4h}{d}\right)$

**Fuente:** Tesis de grado: Análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en CA. [2]

Dónde:

$E_1$  Es el gradiente en la superficie del conductor en kVrms/cm.

C Es la capacitancia en F/m.

$E_c$  Es el gradiente de inyección de corona en kVrms/cm.

$V_c$  Es la tensión de inyección de corona en kV.

**1.4.2 Gotas de agua** El efecto corona se ve ampliamente influenciado por las condiciones climáticas del entorno al cual se encuentran expuestos los conductores, siendo la lluvia una de las principales condiciones.

Bajo condiciones de lluvia, se forman gotas de agua alrededor de los conductores, las cuales debido al efecto de la gravedad, se logran situar en la parte inferior y a lo largo de todo el conductor. Esto genera que el campo eléctrico presente una irregularidad de forma puntual alrededor del conductor, lo cual a su vez ocasiona que cuando el campo eléctrico aumenta, se presenten vibraciones laterales a la frecuencia de la red, oscilaciones verticales y desplazamientos horizontales de las gotas sobre el conductor.

La descarga por corona se vuelve intermitente, tomando forma de impulsos para la semi alternancia negativa, y una luz estable para la semi alternancia positiva. El agua en forma de llovizna o lluvia, es capaz de producir una “película” entorno al conductor, al cabo de un corto tiempo. El agua reduce los niveles de gradiente crítico, provocando de esta forma mayores pérdidas por corona y niveles de interferencias superiores.

La corrección debido a los fenómenos climáticos o ambientales, se aplica mediante el coeficiente ambiental “ $m_t$ ” mostrado en la tabla 2 y aplicado en la ecuación 1.

**Tabla 2.** Valores para el factor ambiental  $m_t$ .

COEFICIENTE AMBIENTAL	
1	Tiempo seco

0,8	Tiempo húmedo
0,16 – 0,25	Tiempo lluvioso

**Fuente:** Tesis de grado: Pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV Quito – Guayaquil. [8]

**1.4.3 Discontinuidad superficial** Con frecuencia se consideran los conductores como elementos cilíndricos y de superficie completamente lisa, sin embargo en la práctica esto no es del todo veraz. Puede ser por imperfección de fábrica, por transporte, por montaje o por uso, la superficie del conductor tendrá algún tipo de imperfecto o rugosidad, lo cual hace que el gradiente crítico sea menor al esperado y calculado de forma teórica.

Las imperfecciones sobre la superficie del conductor permiten que la intensidad del campo eléctrico aumente localmente. La ionización se produce en esos puntos de imperfecciones, para un gradiente de potencial superficial menor que el necesario para producirla, si la superficie del conductor fuese completamente lisa.

De forma similar a como ocurre en el estado físico del conductor, también según sea su aspecto, se verá afectado su gradiente; ya sea porque el conductor se encuentre nuevo, limpio, sucio, envejecido, desgastado, mal tratado, etcétera.

La corrección debido al estado y el aspecto del conductor, se aplica mediante el coeficiente de superficie “ $m_c$ ” especificado en la tabla 3 y aplicado en la ecuación 1.

**Tabla 3.** Valores para el factor de superficie  $m_c$ .

<b>COEFICIENTE DE SUPERFICIE</b>	
1	Conductor liso ideal
0,88 – 0,96	Conductor nuevo y limpio

0,80 – 0,87	Conductor áspero envejecido
0,50 – 0,70	Conductor tratado deficientemente

**Fuente.** Tesis de grado: Pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV Quito – Guayaquil. [8]

**1.4.4 Densidad del aire** Se denomina densidad de aire a la cantidad de masa de aire por unidad de volumen, la cual varía en relación directa a la presión atmosférica e inversa a la temperatura ambiente.

La rigidez dieléctrica del aire y por consiguiente, el valor del gradiente crítico se ven afectados entonces por la variación del efecto de la temperatura y presión. Es por ello que la comisión Electrotécnica Internacional (CEI) permite el cálculo de la densidad relativa del aire mediante la ecuación 2.

La presión atmosférica se puede obtener en función de la altura sobre el nivel del mar, a través de la fórmula de Halley.

$$h = \frac{76}{10^{\left(\frac{y}{18336}\right)}} \quad (3)$$

Dónde:

y: Altitud sobre el nivel del mar [m].

**1.4.5 Humedad** Se le conoce como humedad a la cantidad de vapor de agua contenida en la atmósfera. La cantidad de vapor de agua contenido en la atmósfera es el límite característico correspondiente a cada valor de temperatura. Dicho límite representa el punto de saturación.

La humedad relativa es el cociente entre la cantidad de vapor contenida en la atmósfera y la máxima que podría contener. Ésta puede variar en función de dos efectos, uno es el efecto de la evaporación sobre una superficie de agua, lo cual

hace que la humedad relativa aumente. El otro efecto es el producido por el aumento de la temperatura, lo cual se traduce en un aumento de la humedad relativa. De manera similar, un descenso en la temperatura implica una disminución de la humedad relativa, aunque el vapor de agua presente en el aire sea el mismo.

Dado que el vapor de agua actúa como un gas electronegativo, permite capturar electrones para las moléculas del agua, esta influencia se observa con mayor facilidad en propagaciones lentas y de larga duración de las descargas por corona. Es por esto que se puede asegurar que la humedad afecta al efecto corona en los conductores, primero porque una humedad más alta suprime avalanchas de electrones, y segundo porque crea una mayor concentración de vapor de agua en el conductor y esto genera más puntos corona, realizando las pérdidas.

## **1.5. PROCESO DE DESCARGA EN EL AIRE**

Debido a las radiaciones cósmicas o a la ionización natural de las sustancias radioactivas en la tierra, se encuentra siempre en el aire una serie de electrones libres. [5]

En los conductores sólidos o líquidos, los electrones se encuentran en movimiento constante, ya sea mediante vibración alrededor de su posición de balance, o libremente a través del conductor. Dada la estructura compacta y conectada de los conductores sólidos y líquidos, las partículas cargadas se pueden desplazar con gran facilidad a través del material, aumentando aún más si se le aplica un campo eléctrico, creando una corriente eléctrica asociada al aire.

A pesar de ser considerado el aire como un buen aislador eléctrico, esto debido a su alta composición de moléculas neutras (densidad cercana al orden de  $10^{19}$  moléculas neutras por  $\text{cm}^3$ ), cuando el potencial entre dos electrodos aumenta drás-

ticamente, el gas alcanza un punto donde su ionización y conductividad aumentan, dejando de ser un buen aislador para ser entonces un conductor temporal.

Existe gran cantidad de procesos que contribuyen, beneficiando o perjudicando a la producción de cargas eléctricas en el aire; De acuerdo con su efecto sobre el mismo, se les conoce como procesos favorables o desfavorables a la descarga.

## **1.6. PROCESOS FAVORABLES A LA DESCARGA**

Son aquellos procesos que de forma directa e indirecta permiten y contribuyen a la ionización del medio gaseoso, para posteriormente dar origen a una descarga. Estos procesos son: [4][8]

**1.6.1 Fotoionización** Se da origen a la ionización gracias a los electrones liberados por la fotoionización, la cual consiste en la energía que imparte un fotón (partícula de luz que se propaga en el vacío, responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético) a un átomo para que posteriormente se convierta en electrón y cargue positivamente al ion. Esta ionización se realiza si la energía del fotón incidente es igual o mayor a la energía de ionización de la partícula.

Durante la aceleración en el campo eléctrico, los electrones colapsan con los átomos de los gases presentes en el aire (nitrógeno, oxígeno, etc.), siendo la mayoría de estas colisiones elásticas. El electrón pierde sólo una pequeña parte de su energía en cada colisión, lo cual permite que transfiera energía mediante colisión a gran cantidad de átomos, y si la colisión es muy fuerte, cambia al átomo a un estado de energía más alto.

**1.6.2 Ionización por choque** El desplazamiento de los electrones en una línea de transmisión es principalmente debido al efecto del campo eléctrico generado por la línea. Mientras los electrones se desplazan, se encuentran átomos y moléculas de los gases en el aire, chocando con ellos según sea la aceleración que han adquirido.



Donde  $A$  es un átomo neutro.

$A^+$  es un ion positivo.

$e^-$  es un electrón.

Según sea la energía del electrón (alta o baja), se puede presentar un choque elástico o inelástico.

En el choque elástico la estructura y energía interna de las partículas chocadas no sufren cambios, mientras que el electrón pierde y disipa algo de su energía, ya por si misma baja. Mientras que en el choque inelástico la estructura y energía interna de las partículas colisionadas sufren cambios, los cuales pueden ser:

*Excitación:* Debido al desplazamiento orbital de sus electrones, el átomo pasa a un estado mayor de energía interna. Esta energía hace inestable su estado, pues hay un desprendimiento en exceso mediante la emisión de un fotón, al recuperar el electrón su órbita original.

*Ionización:* Cuando la energía del electrón es aún mayor, el choque provoca el desprendimiento de un electrón del átomo colisionado.



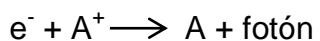
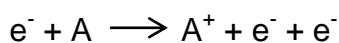
Donde  $A$  es un átomo neutro.  
 $A^+$  es un ion positivo.  
 $e^-$  es un electrón.

El átomo originalmente neutro, pasa a ser un ion positivo al haber perdido un electrón, adquiriendo con ello una carga positiva.

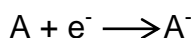
## 1.7. PROCESOS DESFAVORABLES A LA DESCARGA

Son aquellos procesos que de forma directa e indirecta retardan y evitan la ionización del medio gaseoso; estos procesos son: [4][8]

**1.7.1 Recombinación** Cuando ocurre una colisión entre un electrón y un ion positivo, con una energía tan baja como para ocasionar los efectos anteriormente descritos, ocurre una neutralización de ambas cargas. La reacción produce la liberación de una cantidad de energía, la cual es radiada en forma de fotón, siendo por lo tanto:



**1.7.2 Enlace con molécula neutra** Un electrón libre dotado con baja energía puede chocar con un átomo neutro, ligándose a él y formando así un ion negativo. Este ion negativo tiene mayor movilidad que el electrón y por ese motivo, a pesar de conservar la carga, la descarga tiende a neutralizarse.



## **1.8. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS**

Los procesos que con anterioridad fueron descritos, se caracterizan por ser fenómenos probabilísticos; es decir que cada uno tiene una probabilidad de ocurrencia, la cual depende principalmente de la densidad del gas y de la energía que poseen las partículas que lo forman. La probabilidad del choque de la partícula incidente es variable con la energía.

En el caso de la ionización, la probabilidad es nula si la energía es menor que la llamada “energía de ionización”, la cual es propia del elemento en cuestión. Aumenta con el incremento de la energía, y luego disminuye.

En el caso de los fotones, las consideraciones son las mismas a las de la ionización, aunque para este caso la probabilidad es máxima cuando se está más cerca del nivel de ionización.

En los procesos favorables a la descarga actúan principalmente los electrones. Dada la gran masa y dimensión del ion, su movilidad es mínima, por lo cual su probabilidad de ionizar por choque es muy inferior a la de los electrones, siendo considerados inmóviles con respecto a los electrones.

## **1.9. PROCESO DE AVALANCHA DE TOWNSEND**

De forma natural se presenta radiación en el medio, lo cual conlleva al proceso de fotoionización, y este a su vez permite y crea cierto número de pares ion–electrón libres en el aire. Estos pares son los encargados de iniciar el proceso de formación de descargas.

Si un electrón choca con un átomo, y como consecuencia de este choque otro electrón es liberado, ambos son acelerados por el campo eléctrico. Y si dicho campo eléctrico tiene la intensidad suficiente, los electrones son liberados con la energía necesaria para liberar más electrones por medio de colisiones. De esta

forma se produce una reacción en cadena que aumenta de forma considerable la cantidad de electrones e iones libres, formando rápidamente una avalancha.

En aire a presión normal, sólo se presentaría esta avalancha de electrones si el número de electrones liberados por ionización es superior a los ligados por recombinación. Para que una avalancha sea una descarga, el gradiente de voltaje crítico debe alcanzar una magnitud determinada, la cual depende de la polaridad del conductor.

Para tensión alterna, el fenómeno es diferente en cada semiciclo, debido al cambio de la polaridad del conductor.

Este proceso se le conoce como Avalancha de Townsend en honor a John Sealy Townsend, quien descubrió el mecanismo de ionización fundamental por su trabajo entre 1897 y 1901.

**1.9.1 Descripción matemática del proceso de avalancha** Townsend investigó y expresó el proceso de ionización del electrón en forma de ecuación diferencial. [4]

$$dn = \alpha * n * dx \quad (4)$$

Dónde

$dn$  Aumento incremental en el número de electrones producidos.

$\alpha$  Coeficiente.

$n$  El número de electrones en movimiento.

$dx$  Distancia desplazada por los electrones en el campo eléctrico.

El coeficiente  $\alpha$  varía con las características y la densidad del gas que es función de la fuerza del campo eléctrico. Para las condiciones de campo eléctrico uniforme y descargar por corona,  $\alpha$  es una constante y la ecuación (4) se puede integrar:

$$n = n_0 * e^{\alpha*x} \quad (5)$$

Donde  $n_0$  es el número de electrones libres en  $x$  igual a cero. En un caso más general, donde el campo varía en función de  $x$ :

$$n = n_0 * e^{\int_0^x \alpha*x} \quad (6)$$

Además de las moléculas de ionización basadas en colisiones de alta energía, los electrones pueden también combinar muchas moléculas neutras con los iones negativos del gas. Esto sucede con mayor facilidad para los elementos electronegativos, tales como los halógenos, oxígeno y sulfuro, los cuales carecen de electrones en sus capas externas, y por lo mismo tienen una alta afinidad electrónica.

Los gases tales como  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{SF}_6$  son fuertemente electronegativos.

El proceso de recombinación del electrón puede reducir significativamente la ionización del electrón, siendo expresado como:

$$n = n_0 * e^{-\eta*x} \quad (7)$$

Donde  $\eta$  es el coeficiente de la recombinación que es función de las características del gas y de la fuerza del campo eléctrico. Combinando las ecuaciones (6) y (7) se obtiene el valor para un campo uniforme:

$$n = n_0 * e^{(\alpha-\eta)*x} \quad (8)$$

En campos eléctricos bajos,  $\eta$  excede a  $\alpha$ , y el número de electrones disminuye con la distancia.

La presencia de recombinación  $\alpha - \eta$  puede ser considerada como el coeficiente efectivo de ionización, en otras palabras, el límite efectivo de ionización puede ser considerado cuando  $\alpha = \eta$ , ya que la probabilidad de ionización es entonces igual a la probabilidad de recombinación.

## 2. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Dada la necesidad a comienzos del siglo XX de transmitir energía aun cuando el descubrimiento de la electricidad era reciente, Tesla, entre muchos otros científicos de la época hicieron fuertes avances en el tema logrando imponer la energía eléctrica para generar luz por encima del querosene. Una vez que la energía eléctrica se posesionó en la población, los investigadores empezaron a realizar estudios empíricos en la búsqueda de cómo transmitir dicha energía a civilizaciones alejadas del lugar de generación. Se crearon las líneas de transmisión, fue la solución del momento y que hasta nuestros tiempos ha funcionado con la salvedad de que en el siglo XX, en sus comienzos, la transmisión traía consigo pérdidas excesivas por lo que muchos ingenieros empezaron a indagar sobre la problemática; F. W. Peek, Peterson, Claude H. Gary, la General Electric Company, etc.

Debido a que se necesitaba solucionar parte del problema de las pérdidas por transmisión, estos investigadores empezaron a desarrollar métodos empíricos en sus laboratorios para luego aplicarlos a las líneas reales, desde esa época y hasta la presente dichos resultados empíricos han funcionado a la hora de transmitir energía eléctrica teniendo en cuenta pérdidas tales como el efecto corona. Peek y Peterson fueron unos de los tantos científicos que se dedicaron a buscar alternativas para solucionarlo.

De ahí en adelante, algunos investigadores se han enfocado en diferentes aspectos relacionados con las pérdidas por efecto corona, se han realizado estudios experimentales en laboratorios de alta tensión mientras que otros han preferido desarrollar modelos matemáticos para su representación en programas computacionales y en su defecto, buscar alternativas matemáticas para que la estimación o el cálculo no sea tan tedioso. También, existen investigadores que se han dedi-

cado a indagar y analizar las consecuencias que trae consigo el efecto corona, tanto en la transmisión de energía, como en las zonas cercanas a las líneas, consecuencias tales como pérdidas de potencia, ruido audible, radiointerferencia, entre otros.

De los avances que se han hecho en el tema del efecto corona se han obtenido resultados que abarcan grandes cantidades de datos estadísticos sobre pérdidas por corona en función de la geometría del conductor, gradiente del conductor, tensión y condiciones meteorológicas a las cuales están sujetas las líneas. Se ha encontrado que las pérdidas por efecto corona en una línea de alta tensión puede estar entre unos kilovatios por kilómetro por fase en buen tiempo, así como cientos de kilovatios por kilómetro por fase en condiciones de lluvia.

## **2.1. MÉTODO DE PEEK**

El efecto corona ha sido estudio desde comienzos del siglo XX. F.W. Peek<sup>4</sup> empezó a realizar avances del tema desde 1912 cuando trabajaba en General Electric. En el año 1929 Peek publicó su conocido libro sobre efectos dieléctricos en alta tensión, para esta fecha los experimentos no superaban los 200 kV.

Desde los años de 1900 el “Consulting Department of The General Electric” bajo supervisión del Dr. C. P. Steinmetz llevó a cabo investigaciones relacionadas a la rigidez dieléctrica del aire y más particularmente a las pérdidas por efecto corona en las líneas de transmisión. Las instalaciones de dicho departamento constaban básicamente de aparatos, instrumentos y normalización relacionados con la energía eléctrica, en dicha investigación trabajaron el Dr. E. J. Berg, C. M. Davis, J. L. R. Hayden, A. B. Hendricks, W. K. Page, L. T. Robinson, L. A. Schloss, W. I. Slichter, C. W. Stone y J. B. Taylor. [14]

---

<sup>4</sup> Ingeniero Norteamericano que realizó avances en la estimación del efecto corona en líneas de transmisión.

De estas investigaciones se obtuvieron resultados empíricos que hasta la presente han funcionado. F. W. Peek fue uno de los primeros investigadores en dar una fórmula empírica para calcular las pérdidas de corona en las líneas de transmisión con conductores cilíndricos totalmente lisos.

En sus estudios experimentales debía tener en cuenta que para aplicar sus resultados a la vida real necesitaba agregar un factor que tuviese en cuenta las características generales del conductor para tener una buena estimación de las pérdidas por efecto corona. Aunque inicialmente las tensiones que utilizó en el laboratorio fueron por debajo de los 200 kV, observó que sus fórmulas eran viables y funcionalmente aceptables a tensiones mayores a las que había utilizado en sus experimentos.

Peek tuvo en cuenta en sus estudios experimentales que las líneas de transmisión reales tienen conductores que se alejan de ser perfectamente lisos, por tal razón incluyó un factor  $m$ , conocido como el factor de irregularidad de la superficie del conductor, dicho factor tiende a mejorar el campo eléctrico en la proximidad inmediata de la superficie del conductor y en consecuencia, reduce el gradiente de inicio calculado utilizado con el radio normal del conductor.

De los estudios enfocados a la estimación de pérdidas por efecto corona realizados en la época por el “Consulting Department of The General Electric” y el ingeniero F. W. Peek se logró concluir lo siguiente:

1. En las líneas de transmisión de corriente alterna se presentan pérdidas por disipación de la energía en el aire, éstas van acompañadas con una luminosidad del aire que rodea el conductor de la línea, razón por la cual recibe el nombre de corona. Las pérdidas presentadas van asociadas a una tensión crítica que depende del diámetro y espaciamiento entre los conductores de una línea, las cuales se hacen significativas a medida que la tensión crítica va aumentando.

Con los resultados obtenidos por el *Consulting Department of the General Electric* Peek desarrolló un modelo matemático general para el cálculo del gradiente crítico, el cual es uno de los elementos más importantes a conocer para saber si la línea de transmisión presenta pérdidas por efecto corona. Dicho modelo matemático también llamado el gradiente de potencial en la superficie del conductor se representó en la ecuación 1, teniendo en cuenta el coeficiente m. [1]

$$E_c = E_o * \delta * m_t * m_c * \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta r}}\right) \quad (9)$$

Dónde:

$E_c$ : Gradiente crítico de Peek [kVrms/cm] para configuraciones de conductores en paralelo.

$E_o$ : Gradiente crítico disruptivo del aire.

29,8 [kV/cm] (Valor máximo)

21,1 [kV/cm] (Valor efectivo)

$\delta$ : Factor de corrección de la densidad del aire (Ecuación 2).

$m_t$ : Coeficiente meteorológico.

1 si es Seco

0,8 si es Húmedo

0,16 – 0,25 si es Lluvia

$m_c$ : Coeficiente de rugosidad del conductor<sup>5</sup>.

1 si Conductor liso ideal

0,88 – 0,96 si es Conductor nuevo y limpio

0,80 – 0,87 si es Conductor áspero envejecido

0,50 – 0,70 si es Conductor tratado deficientemente

$r$ : Radio del conductor [cm].

---

<sup>5</sup> Los valores de  $m_c$  fueron obtenidos empíricamente basados en datos de laboratorio con un conductor tipo ACSR y puede extendido a conductores con hilos en su capa exterior.

2. Las pérdidas por efecto corona en una línea de transmisión se ven reflejadas por una luminosidad del aire que rodea a los conductores de la línea, ésta comienza cuando el gradiente crítico disruptivo es menor al gradiente de tensión superficial.

El gradiente de tensión superficial presente en un conductor se determina por la siguiente relación:

$$E = \frac{V_{fase-tierra}}{r \cdot \ln\left(\frac{DMG}{RMG}\right)} \quad (10)$$

Dónde:

$E$ : Gradiente de tensión superficial [kVrms/cm].

$V_{fase-tierra}$ : Nivel de tensión en el conductor entre conductor y tierra [kV].

$r$ : Radio del conductor [cm].

$DMG$ : Distancia media geométrica [cm].

$RMG$ : Radio medio geométrico [cm].

Para evitar la manifestación del efecto corona, se debe cumplir:

$$\frac{E_c}{\sqrt{2}} > E \quad (11)$$

Una vez demostrada la existencia del efecto corona en el conductor, se procede a calcular el valor de las pérdidas por dicho efecto empleando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{241 \times 10^{-5}}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{RMG}{DMG} \left[ \ln \frac{DMG}{RMG} \right]^2} RMG^2 (E - E_c)^2 \quad \left[ \frac{kW}{km} \right]. \quad (12)$$

Dónde:

$P$ : Pérdidas monofásicas por efecto corona [kW/km]

$\delta$ : Factor de corrección de la densidad del aire (Ecuación 2).

$f$  = Frecuencia [Hz].

$DMG$ : Distancia media geométrica [cm].

$RMG$ : Radio medio geométrico [cm].

$E$ : Gradiente de tensión superficial [kVrms/cm].

$E_c$ : Gradiente crítico de Peek [kVrms/cm].

La reducción del gradiente crítico de Peek puede tenerse en cuenta por la disminución del valor  $m$ , es decir, un valor menor a 1. Por lo tanto, el factor  $m_c$  tiene en cuenta las incertidumbres derivadas de las condiciones superficiales prácticas (reales) del conductor y se puede definir como la relación entre la medida del gradiente de inicio o gradiente crítico de Peek y la calculada para un conductor con superficie cilíndrica lisa del mismo radio, así mismo, el factor  $m_t$  tiene en cuenta las condiciones atmosféricas presentes en la línea de transmisión, sabiendo que en condiciones de lluvia este factor disminuye, aumentando drásticamente las pérdidas por efecto corona.

Los factores considerados anteriormente afectan la distribución del campo eléctrico cerca de la superficie del conductor y como resultado influye en el gradiente crítico de Peek, es decir, el gradiente de inicio de corona. Otros factores que caracterizan el ambiente afectan a los procesos de ionización que conducen a descargas de corona y pueden, por lo tanto, también afectar al gradiente inicial de corona.

## **2.2. MÉTODO DE PETERSON**

Desde 1884 hasta mediados de 1962 existió el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos (AIEE – American Institute of Electrical Engineers) fundado por los inventores y científicos más destacados e innovadores en el nuevo campo de la ingeniería eléctrica, entre ellos Nikola Tesla, Thomas Alva Edison, Elihu Thomson,

Edwin J. Houston y Edwards Weson; el propósito de dicho Instituto era el de promover las artes y las ciencias relacionadas con la producción y utilización de la electricidad y el bienestar de los empleados de esta industria por medio de las relaciones sociales, la lectura y discusión de trabajos profesionales y de la circulación por medio de publicación entre los miembros y asociados.

El AIEE se fusionó con el Instituto de Ingenieros de Radio (IRE – Institute of Radio Engineers) formando lo que hoy se conoce como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers). [16]

S. Peterson<sup>6</sup>, publicó en 1933 en una reunión del AIEE una fórmula para estimar las pérdidas por corona en una línea de transmisión a ciertas condiciones, dicha fórmula es: [4]

$$P_c = \frac{111,13 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot V_f^2 \cdot \varphi}{\left[\ln\left(\frac{DMG}{r}\right)\right]^2} \quad (13)$$

Dónde:

$P_c$ : Potencia de pérdidas por corona [kW/km].

$f$ : Frecuencia del sistema [Hz].

$V_f$ : Tensión eficaz entre fase y neutro [ $kV_{rms}$ ].

$\varphi$ : Factor de forma que depende de la relación  $V_f/V_0$ .

DMG: Distancia media geométrica [cm]

$r$ : Radio del conductor [cm]

Para evaluar el valor de  $\varphi$  se deben conocer los valores de la tensión eficaz  $V_f$  y la tensión crítica  $V_0$ , una vez conocidos, se calcula su relación, la cual se emplea para estimar el valor de forma de la tabla 6, o las figuras 8 y 9.

---

<sup>6</sup>Investigador y científico de principios del siglo XX que desarrollo una fórmula empírica para la estimación de las pérdidas por efecto corona

El método de Peterson inicialmente se expuso para circuitos de un solo conductor por fase, en la cual presenta mejores aproximaciones para conductores cuyo diámetro supere una (1) pulgada. Posteriormente, se logró la adaptación del método para circuitos donde se disponga de dos o más conductores por fase. [3][21]

Para líneas de transmisión que disponga de un solo conductor por fase:

$$V_0 = g_0 * r * \ln\left(\frac{DMG}{r}\right) \text{ [kVrms]} \quad (14)$$

Para circuitos donde se disponga de dos o más conductores por fase:

$$V_0 = g_0 \left[ 1 + \frac{(n-1)*r}{r_g} \right] * n * r * \ln \left[ \frac{2*h_{mc}*DMG}{RMG \sqrt{4*h_{mc}^2 + DMG^2}} \right] \quad (15)$$

Dónde

$g_0$ : Gradiente de potencial

$$g_0 = 30 * m_s * m_f * (1 - 0,07r)\delta^{2/3} \quad (16)$$

$$h_{mc} = h_{CT} - \frac{2}{3}f_l \quad (17)$$

$$r_g = \frac{B}{2*\text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (18)$$

Dónde:

$V_0$ : Tensión crítica de corona [kV<sub>rms</sub>].

$m_s$ : Factor de corrección por el estado de la superficie del conductor.

$m_f$ : Factor de forma del conductor.

$\delta$ : Densidad relativa del aire.

$RMG$ : Radio Medio Geométrico [cm].

$r_g$ : Radio geométrico del haz [cm].

$h_{CT}$ : Altura del conductor en la torre [m].

$f_l$ : Flecha [m].

$B$ : Separación entre dos conductores consecutivos en el haz de una fase.

En la ecuación 16, el valor de 30 es encontrado regularmente como 21,21 ; de cualquier forma es correcta su aplicación, siempre y cuando se tenga claro que se trabaja con valores picos y efectivos, respectivamente.

Para los factores “m”, a través de los años diversos científicos han adoptado valores, criterios y rangos que pueden ser tomados como el valor numérico del factor, sin embargo, hasta el momento no se han estipulado y estandarizado unos parámetros fijos a la hora de seleccionarlo. En la tablas 4 y 5 se muestran los valores comúnmente más empleados para el factor de corrección por el estado de la superficie del conductor y para el factor de forma del conductor, respectivamente.

**Tabla 4.** Valores de  $m_s$  para el estado de la superficie del conductor

$m_s$	Estado de la superficie del conductor
1	Limpia o lisa
0,9	Envejecida
0,8	Nueva
0,7	Sucia o engrasada
0,3 – 0,5	Húmeda

**Fuente:** Begamudre. [9]

**Tabla 5.** Valores de  $m_f$  según la forma del conductor

$m_f$	Forma del conductor
1	Perfectamente circular
0,9	Con 12 a 30 hilos en la capa externa
0,85	Con 6 hilos en la capa externa

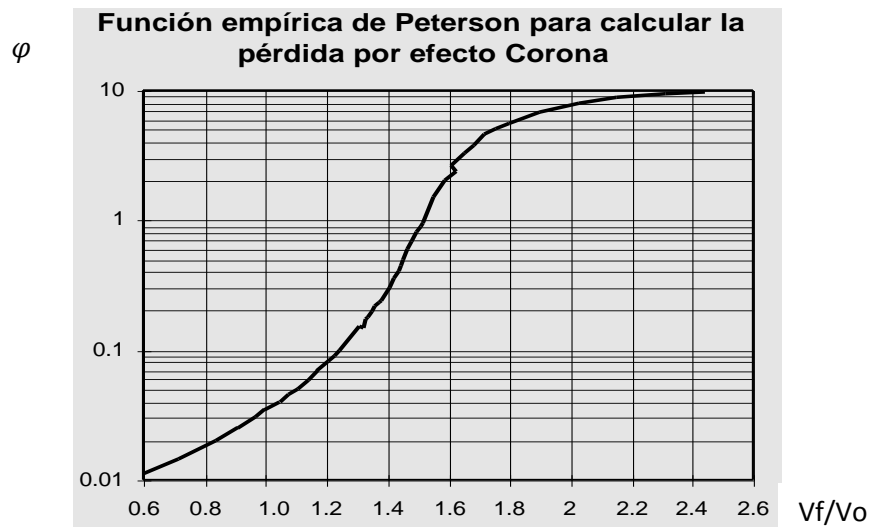
**Fuente:** Begamudre. [9]

Valores del coeficiente  $\varphi$  :

**Tabla 6.** Valores del coeficiente  $\varphi$  obtenidos de la figura 8.

$V_f/V_0$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7
$\varphi$	0,011	0,014	0,018	0,025	0,036	0,053	0,085	0,15	0,95	2,12	4,6

**Figura 8.** Función de Peterson para el cálculo de efecto corona.



**Fuente:** Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book.

**Figura 9.** Continuación de la función de Peterson para la estimación del factor  $\varphi$ .



**Fuente:** Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book.

### 2.3. MÉTODO DE EPRI

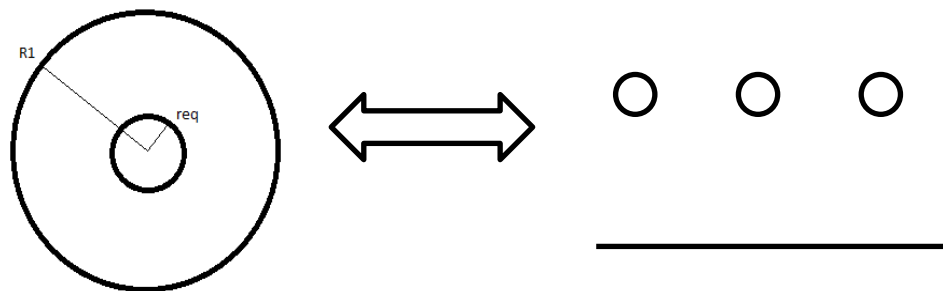
**EPRI (Electric Power Research Institute):** “En noviembre de 1965, el gran apagón del noreste dejó 30 millones de personas en los Estados Unidos sin electricidad, lo que demostró crudamente la creciente dependencia de la nación en la electricidad y la vulnerabilidad a la pérdida. Esto marcó un hito para la industria y provocó la creación del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI).

Aunque la energía fue restaurada en gran parte dentro de 12 horas, el efecto estuvo en escrutinio público y político y continuaron durante años. Algunos en el congreso de Estados Unidos estaban preocupados por la dependencia de la nación en una industria fragmentada para el que no hubo planificación unificada. ¿Cómo podrían miles de empresas de servicios públicos integrar físicamente y confiar en que funcionará como un sistema unificado?

El Dr. Chauncey Starr, quien desempeñó un papel fundamental en la gestión del proyecto Manhattan y que fue un innovador de la tecnología nuclear comercial y gestión de riesgos, respondió a la llamada del congreso para crear una organización de investigación independiente y el desarrollo para apoyar a la industria eléctrica y abordar las principales dudas. Desde sus inicios en 1972, la membresía del Electric Power Research Institute ha crecido hasta representar aproximadamente el 90% de la electricidad generada en los Estados Unidos y se extiende a más de 30 países a nivel internacional.

Mucho ha cambiado en la industria de la electricidad con los avances en tecnologías tales como la energía renovable, los controles ambientales, y la red inteligente. Las oportunidades para la innovación y los retos que enfrentan los servicios públicos son más diversos que nunca. Pero el compromiso con la objetividad y sin defensa se mantiene sin cambios, y la necesidad continua de innovación tecnológica, liderazgo y experiencia técnica siguen siendo los pilares del EPRI.”<sup>7</sup>

**Figura 10.** Configuración coaxial equivalente a una línea de transmisión.



Con base en el planteamiento mostrado en el EPRI, durante ya hace decenas de años se desarrolló un método empírico basado en mediciones de pérdidas por efecto corona en jaulas de ensayo donde se usa una configuración coaxial equivalente a una línea de transmisión como se muestra en la figura 10; esta equivalen-

<sup>7</sup> Historia tomada de [en línea]: <http://www.epri.com/About-Us/Pages/Our-Story.aspx>

cia se hace por medio del factor  $k$ ; dicha metodología se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P_{línea} = kP_e \quad (19)$$

Dónde:

$P_{línea}$ : Pérdidas totales de una línea de transmisión.

$P_e$ : Pérdidas reducidas de la jaula de ensayo.

$k$ : Factor electrogeométrico

$$k = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{r_{eq}}\right)}{\ln\left(\frac{R_1}{\rho}\right)} \quad (20)$$

Dónde:

$r_{eq}$ : Radio equivalente del haz (radio de un conductor sencillo con la misma capacitancia) [cm].

$R_1$ : Radio de la jaula equivalente (radio de un coaxial aterrizado que tenga la misma capacitancia) [cm].

$\rho$ : Radio corona (distancia promedio equivalente entre la carga espacial producida por el efecto corona y el centro del haz) [cm].

$$\rho = \sqrt{\frac{16200}{f} nr + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (21)$$

$B$ : separación entredós subconductores adyacentes de una fase [cm].

$n$ : número de subconductores del haz.

$r$ : Radio del conductor [cm].

$f$ : Frecuencia [Hz].

Para determinar  $R_1$  con la línea completamente transpuesta inicialmente se determina la capacitancia por fase  $C_\varphi$  de la línea de transmisión.

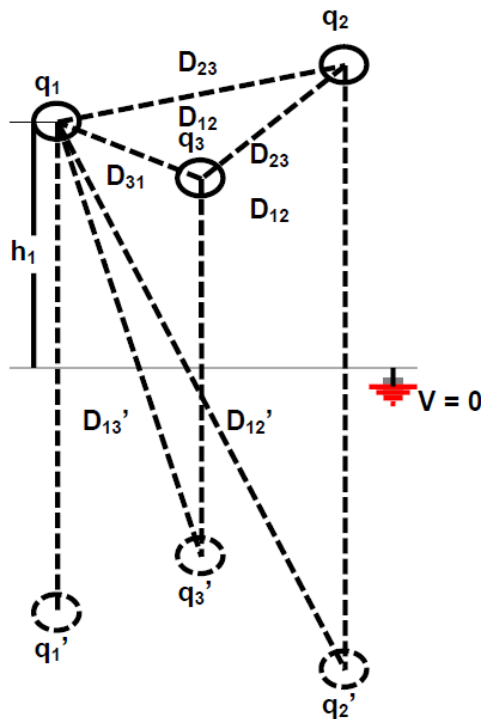
$$R_1 = r e^{\frac{2\pi\epsilon_0}{C_\varphi}} \quad (22)$$

$$C_\varphi = c_{ii} - c_{ij} \quad (23)$$

Donde  $c_{ii}$  es el coeficiente de capacitancias propias y  $c_{ij}$  es el coeficiente de capacitancias mutuas.

Para encontrar la capacitancia por fase se debe construir la matriz de coeficientes de potencial utilizando el método de las imágenes tal cual como se muestra en la Figura 11:

**Figura 11.** Esquema del método de las imágenes para el cálculo de los coeficientes de potencial



**Fuente:** Tesis de grado: Campo eléctrico en líneas de alta tensión. Comparación crítica de sus valores límites de exposición teniendo como referencia la normatividad colombiana. [6]

$$[c] = [P]^{-1} \quad (24)$$

Dónde:

[c]: Matriz de coeficientes de capacitancia

[P]: Matriz de coeficientes de potencial

Los coeficientes de potencial se hallan de la siguiente manera:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{D'_{ij}}{D_{ij}}\right) \quad \text{Para } i \neq j \quad (25)$$

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad \text{Para } P_{ij} = P_{ji} \quad (26)$$

Dónde:

$\epsilon_0$ :  $8,854 \times 10^{-12}$  [F/m]

$r_i$ : Radio del conductor (Si hay más de 1 conductor,  $r_i$  se convertirá en  $r_{eq}$ . [cm].

$$r_{eq} = R \left(\frac{nr}{R}\right)^{1/n} \quad (27)$$

Dónde:

$r_{eq}$ : Radio equivalente de la fase [cm]

r: Radio de cada subconductor [cm].

n: Número de subconductores en el haz

R: Radio geométrico del haz [cm].

$$R = \frac{B}{2\text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (28)$$

Dónde:

B: Separación entre subconductores consecutivos en haz [cm].

Dependiendo de la cantidad y tipo de conductor que se utilice cambiará el valor de las pérdidas reducidas ( $P_e$ ) mediante las desarrolladas por el ingeniero Julio Rúgeles Jones, resultado de su investigación “Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa)”.<sup>8</sup>

En las tablas 7 y 8 se muestran los resultados de las ecuaciones determinadas.

---

<sup>8</sup> Investigación financiada por COLCIENCIAS en el año 1995 cuyo investigador fue el ingeniero Julio Rúgeles Jones con ayuda de estudiantes de maestría de la época.

Tabla 7

Funciones de generación de pérdidas corona para buen clima

**Tabla 7.** Resultados de las investigaciones adaptadas a las condiciones de Bucaramanga

Conductor	Radio [cm]	n = 1	n = 2*	n = 4*
Darien	1,09	$0,084(E - 11,48)^2 - 0,5$	$0,4552(E - 14,31)^2 - 0,3526$	$0,1502(E - 10,63)^2 - 0,005$
Flint	1,26	$0,1784(E - 13,77)^2 - 0,2128$	$0,2747(E - 12,04)^2 + 0,252$	$0,3471(E - 11,73)^2 - 0,228$
Canary	1,475	$0,2792(E - 13,63)^2 + 0,0677$	$0,2954(E - 12,15)^2 + 0,325$	
Curlew	1,58	$0,3578(E - 15)^2 + 0,8889$	$0,3652(E - 12,03)^2 + 0,534$	
AAAC - 1200	1,605	$0,241(E - 13,43)^2 - 0,1724$		
AAAC - 1500	1,795	$0,5183(E - 15,46)^2 - 0,5695$		

**Fuente:** Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa). [5]

\* Para B = 45,72 [cm]

Tabla 8

Funciones de generación de pérdidas corona para lluvia

**Tabla 8.** Resultados de las investigaciones adaptadas a las condiciones del laboratorio de A.T UIS

Conductor	Radio [cm]	n = 1	n = 2*	n = 4*
Darien	1,09	$0,09474(E - 10,27)^2 + 0,3472$	$0,2406(E - 9,38)^2 + 0,662$	$0,3071(E - 6,648)^2 + 0,395$
Flint	1,26	$0,156(E - 11,56)^2 + 0,1435$	$0,03564(E - 5,05)^2 + 0,1435$	$0,2919(E - 6,96)^2 + 0,3894$
Canary	1,475	$0,1413(E - 6,964)^2 - 0,08$	$0,232(E - 5,464)^2 - 0,458$	
Curlew	1,58	$0,1861(E - 8,7)^2 - 0,1027$	$0,2784(E - 7,85)^2 + 0,6$	
AAAC – 1200	1,605	$0,1516(E - 8,5)^2 + 0,34$		
AAAC – 1500	1,795	$0,168(E - 8,87)^2 + 0,678$		

**Fuente:** Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa). [5]

\* Para B = 45,72 [cm]

Donde el común de las ecuaciones mostradas en las tablas 7 y 8 es el campo eléctrico E, la forma de calcularlo es utilizando el teorema de Gauss:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\rho} \quad (29)$$

Dónde:

$\rho$ : Distancia desde el conductor hasta el punto en el cual se desea calcular el campo eléctrico.

[Q]: [c][V]: Vector de cargas

En este trabajo de grado, el campo eléctrico E se calcula utilizando el método de las imágenes mediante el programa realizado en lenguaje Matlab E\_corona.m. En el capítulo 3 y en el anexo A se muestra el desarrollo de dicho programa.

### **3. PROGRAMA PARA REALIZAR LA ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA CON LOS MÉTODOS EPRI, PETERSON Y PEEK.**

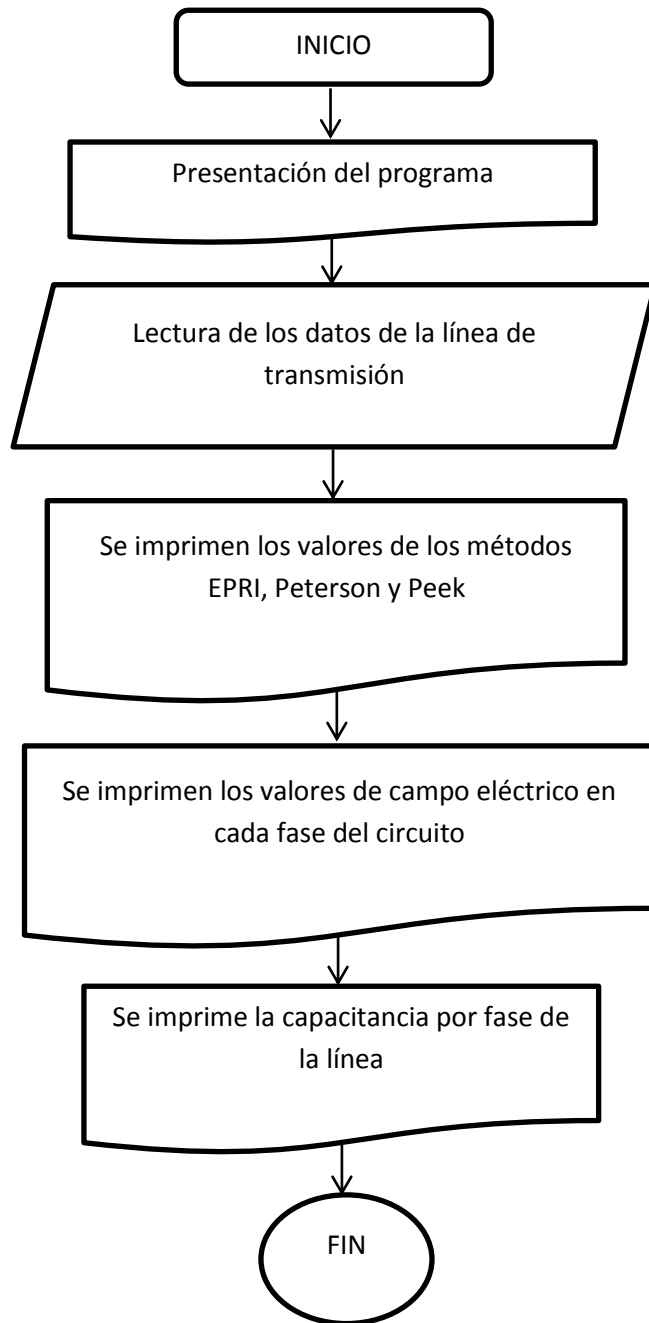
En el presente proyecto se desarrolla un programa computacional donde se estiman las pérdidas en configuraciones de líneas de transmisión de no más de 2 circuitos, el cual se necesita como herramienta de software en el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

El programa computacional desarrollado tiene como nombre E\_corona, del cual se tomó como base el código NIVEL.m que calcula el campo eléctrico alrededor de los conductores de la línea de transmisión.

A NIVEL.m se le anexaron las ecuaciones para estimar las pérdidas por efecto corona, el trabajo final realizado consiste en ingresar los parámetros de la línea de transmisión para posteriormente realizar los cálculos de las pérdidas por los métodos EPRI, Peterson y Peek, adicionalmente se muestra el campo eléctrico de las fases de cada circuito y la capacitancia por fase.

El manual de usuario de E\_corona se encuentra en el Anexo A, el lenguaje de programación hecho en MATLAB se encuentra en el Anexo B. La estructura y lógica de E\_corona se especifican en el siguiente diagrama de flujo, la figura 12.

Figura 12. Diagrama de flujo del programa



#### **4. APLICACIÓN DE LAS 3 METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA ESTIMAR LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN A ALTAS TENSIONES.**

En este capítulo, a tres (3) configuraciones de líneas de transmisión reales se aplicarán los métodos explicados en el capítulo 2. Para cada línea y cada método se mostrará la estimación de pérdidas por efecto corona para posteriormente realizar un análisis de los resultados obtenidos.

Se mostrará el cálculo tipo a la configuración de línea 1, las otras dos tienen el mismo procedimiento por lo que los resultados totales se evidencian en las tablas 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 16 y 17. [12]

##### **4.1. LÍNEA DE TRANSMISIÓN 1**

La primera configuración de una línea de transmisión es la de Fundación – Río Córdoba (ISA, 1979), la cual tiene las siguientes especificaciones:

Tensión de operación: 115 kV

Capacidad de la línea: 126 MVA

Número de conductores por fase: 1

Distancia entre fases: 4,5 m

Altura de la fase a la tierra: 15 m

Radio del conductor: 1,09 cm (Conductor Darién)

Número de cables de guarda: 2

Longitud de la línea: 68,5 km

Configuración de la línea: Circuito sencillo horizontal

Temperatura media: 28°C

Altura media sobre el nivel del mar: 45 msnm<sup>9</sup>

**4.1.1 Método Peek** Aplicando la metodología explicada en el capítulo 2 se procede a calcular el gradiente crítico de Peek, para esto se calcula inicialmente el factor de corrección de la densidad del aire ( $\delta$ ) y la presión barométrica.

Presión barométrica, usando la ecuación 3.

$$h = \frac{76}{10^{45/18336}} = 75,572 \text{ cm de Hg}$$

Factor de corrección de la densidad del aire, ecuación 2.

$$\delta = \frac{3,855 * 75,572}{273 + 28} = 0,968$$

El siguiente paso es determinar y especificar los parámetros  $m_t$  y  $m_c$ .

$m_t$ : Dado que se quiere analizar el caso más crítico en cuanto a condiciones atmosféricas, se escoge  $m_t$  de 0,2 que está en el rango de lluvia.

$m_c$ : La línea de transmisión Fundación – Río Córdoba entro en operación en el año 1979, por tal motivo el coeficiente de rugosidad del conductor se asume en el rango de áspero envejecido, siendo entonces  $m_c$  de 0.85.

Con los datos anteriormente calculados se procede a encontrar la tensión o gradiente crítico de Peek dada en la ecuación 1.

$$E_c = 29,8 * 0,968 * 0,2 * 0,85 * \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{0,968 * 1,09}}\right) = 6,341 \text{ kV/cm}$$

---

<sup>9</sup> Dato obtenido de[en línea] <<http://www.municipios.com.co/magdalena/fundacion#.VCAyDMV5MaY>>

Se debe calcular la distancia media geométrica (DMG).

Ya que es un circuito simple, la ecuación para calcular la DMG es:

$$DMG = \sqrt[3]{(4,5) * (4,5) * (2 * 4,5)} = 5,67 \text{ m}$$

El radio medio geométrico (RMG) se calcula mediante la expresión 28:

Cuando hay un solo conductor en haz, el RMG será el mismo radio del conductor, es decir,  $RMG = 1,09 \text{ cm}$

El gradiente crítico de Peek se compara con el gradiente de tensión superficial (Ecuación 10) para determinar si hay pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión

$$E = \frac{115}{\sqrt{3} * 1,09 * \ln\left(\frac{567}{1,09}\right)} = 9,74 \text{ kV/cm}$$

El objetivo principal al aplicar el método Peek es encontrar el gradiente crítico de Peek y el gradiente de tensión superficial para realizar la comparación de la ecuación 11 sabiendo así, si realmente hay o no hay pérdidas por efecto corona.

Dado que  $\frac{6,341}{\sqrt{2}} = 4,484$  es menor que 9,74 se concluye que hay efecto corona.

El siguiente paso es aplicar la fórmula 12 para estimar estas pérdidas

$$P_{\varphi-peek/km} = \frac{241 \times 10^{-5}}{0,968} * (60 + 25) \sqrt{\frac{1,09}{567} \ln\left(\frac{567}{1,09}\right)^2} 1,09^2 (9,74 - 6,341)^2$$

Finalmente se encuentra que las pérdidas por corona de acuerdo a la metodología Peek corresponden a:

$$P_{\varphi-peek/km} = 0,7965 \frac{kW}{km - fase}$$

**4.1.2 Método Peterson** En este método inicialmente se asignan unos valores a los factores  $m_s$  y  $m_f$  para luego calcular  $g_0$  con la expresión 16.

$m_f$  Corresponde al factor de forma del conductor, la tabla 5 especifica los valores dependiendo de su forma. Para la presente configuración se utiliza conductor Darién, teniendo 19 hilos en la capa externa, por tal motivo  $m_f$  tiene un valor de 0,9.

$m_s$  Especifica el estado de la superficie del conductor, para aplicar la metodología Peek se mencionó que el conductor tiene la característica de ser áspero y envejecido, para el caso de la metodología Peterson y con ayuda de la tabla 4 se asume una superficie del conductor envejecida, siendo entonces el valor de  $m_s$  de 0,9.

Es decir  $g_0$  será:

$$g_0 = 30 * 0,9 * 0,9 * (1 - 0,07 * 1,09) * 0968^{\frac{2}{3}} = 21,964 \text{ kV/cm}$$

Teniendo  $g_0$  se calcula, utilizando la expresión 14,  $V_0$

$$V_0 = 21,964 * 1,09 * Ln\left(\frac{567}{1,09}\right) = 149,730 \text{ kVrms}$$

Para calcular las pérdidas existentes en una línea de transmisión por el método Peterson se debe calcular un factor  $\varphi$  por medio de una gráfica que dicho autor realizó en su investigación.

La relación es  $V_f/V_0$ , dando como resultado 0,443. En la tabla 6 y figuras 8 y 9 se busca el valor de  $\varphi$ .

Como se puede observar, la relación de  $V_f/V_o$  es tan pequeña que el análisis que realizó Peterson no contempla dicho valor, no existen pérdidas.

**4.1.3 Método EPRI** Para la implementación de esta metodología se empieza calculando el radio corona según la expresión 21.

$$\rho = \sqrt{\frac{16200}{60} * 1 * 1,09 + \left(\frac{0}{2}\right)^2} = 17,155 \text{ cm}$$

Con ayuda del programa E\_corona<sup>10</sup> se encuentra la capacitancia por fase y el campo eléctrico promedio de los 3 conductores.

$$C_\varphi = 8,9745 \times 10^{-12} \text{ F/fase}$$

$$E = 9,8523 \text{ kV/cm}$$

Ahora se calcula el radio de la jaula equivalente con la ecuación 22.

$$R_1 = 1,09e^{\left(\frac{2\pi\epsilon_o}{8,9745 \times 10^{-12}}\right)} = 536,53 \text{ cm}$$

Los anteriores cálculos se encuentran con el fin de aplicar la ecuación 20.

$$k = \frac{\ln\left(\frac{536,53}{1,09}\right)}{\ln\left(\frac{536,53}{17,155}\right)} = 1,8$$

Una vez obtenido el coeficiente electrogeométrico k se calculan las pérdidas por efecto corona utilizando la metodología EPRI, se tiene en cuenta que es un con-

---

<sup>10</sup>Ejecutable realizado y explicado en el presente proyecto (Capítulo 3)

ductor Darién con 1 conductor en haz y se asume la condición más desfavorable que para este caso es un ambiente de lluvia, es decir, se utilizará la expresión de la tabla 8 para  $n = 1$ , y con el conductor utilizado en la línea.

$$P_{\varphi-EPRI/km} = 1,8 * (0,09474(9,8523 - 10,27)^2 + 0,3472)$$

Finalmente se encuentra que las pérdidas por efecto corona por fase de acuerdo a la metodología EPRI corresponde a:

$$P_{\varphi-EPRI/km} = 0,655 \frac{kW}{km - fase}$$

En las tablas 9, 10 y 11, se presenta el resumen de la estimación de efecto corona para la línea de 115 [kV].

### Método Peek

**Tabla 9.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método Peek.

Presión barométrica (h)	75,572 cm de Hg
Factor de corrección de la densidad del aire ( $\delta$ )	0,968
Factor ambiental ( $m_t$ )	0,2
Factor superficial del conductor ( $m_c$ )	0,85
Gradiente crítico de Peek ( $E_c$ )	6,341 kV/cm
DMG	5,67 m
RMG	1,09 cm
Gradiente de tensión superficial (E)	9,74 kV/cm
Pérdidas por efecto corona	0,7965 kW/km-fase

### Método Peterson

**Tabla 10.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método Peterson.

Factor de forma del conductor ( $m_f$ )	0,9
Factor de corrección por el estado de la superficie del conductor ( $m_s$ )	0,9
Gradiente de potencial ( $g_o$ )	21,964 kV/cm
Tensión crítica de corona ( $V_o$ )	149,730 kV
$V_f/V_o$	0,443
$\varphi$	--
Pérdidas por efecto corona	No hay pérdidas

### Método EPRI

**Tabla 11.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método EPRI.

Radio corona ( $\rho$ )	17,155 cm
Capacitancia por fase ( $C_\varphi$ )	$8,9745 \times 10^{-12} F/fase$
Campo eléctrico promedio ( $E$ )	9,8523 kV/cm
Radio de la jaula equivalente ( $R_1$ )	536,53 cm
Factor electrogeométrico ( $k$ )	1,8
Pérdidas por efecto corona	0,655 kW/km-fase

## 4.2. LÍNEA DE TRANSMISIÓN 2

La segunda configuración de una línea de transmisión es la de Copey – Fundación (ISA, 1979), la cual tiene las siguientes especificaciones:

Tensión de operación: 230 kV

Capacidad de la línea: 278 MVA

Número de conductores por fase: 1  
 Distancia entre fases: 8 m  
 Altura de la fase a la tierra: 20 m  
 Radio del conductor: 1,09 cm (Conductor Darién)  
 Número de cables de guarda: 2  
 Longitud de la línea: 60 km  
 Configuración de la línea: Circuito sencillo horizontal  
 Temperatura media: 28°C  
 Altura media sobre el nivel del mar: 108 msnm

#### 4.2.1. Método Peek

**Tabla 12.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método Peek.

Presión barométrica (h)	74,98 cm de Hg
Factor de corrección de la densidad del aire ( $\delta$ )	0,960
Factor ambiental ( $m_t$ )	0,2
Factor superficial del conductor ( $m_c$ )	0,85
Gradiente crítico de Peek ( $E_c$ )	6,294 kV/cm
DMG	10,08 m
RMG	1,09 cm
Gradiente de tensión superficial (E)	17,84 kV/cm
Pérdidas por efecto corona	7,590 kW/km-fase

#### 4.2.2. Método Peterson

**Tabla 13.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método Peterson.

Factor de forma del conductor ( $m_f$ )	0,9
Factor de corrección por el estado	0,9

de la superficie del conductor ( $m_s$ )	
Gradiente de potencial ( $g_o$ )	21,843 kV/cm
Tensión crítica de corona ( $V_o$ )	162,604 kV
$V_f/V_o$	0,817
$\varphi$	0,01919
Pérdidas por efecto corona	0,048 kW/km-fase

#### 4.2.3. Método EPRI

**Tabla 14.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método EPRI.

Radio corona ( $\rho$ )	17,155 cm
Capacitancia por fase ( $C_\varphi$ )	$8,225 \times 10^{-12}$ F/fase
Campo eléctrico promedio ( $E$ )	18,05 kV/cm
Radio de la jaula equivalente ( $R_1$ )	943,9 cm
Factor electrogeométrico ( $k$ )	1,688
Pérdidas por efecto corona	10,266 kW/km-fase

#### 4.3. LÍNEA DE TRANSMISIÓN 3

La tercera configuración de una línea de transmisión es la de Chinú – Sabanalarga (SMA, 1986), la cual tiene las siguientes especificaciones:

Tensión de operación: 500 kV

Capacidad de la línea: 1985 MVA

Número de conductores por fase: 4

Distancia entre fases: 10,5 m

Altura de la fase a la tierra: 23 m

Distancia entre subconductores: 45,72 cm

Radio del conductor: 1,26 cm (Conductor Flint)

Número de cables de guarda: 2

Longitud de la línea: 186 km

Configuración de la línea: Circuito sencillo horizontal

Temperatura media: 30°C

Altura media sobre el nivel del mar: 103 msnm

Flecha promedio: 17 m

Altura del conductor en la torre: 23 m

#### 4.3.1. Método Peek

**Tabla 15.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método Peek.

Presión barométrica (h)	75,02 cm de Hg
Factor de corrección de la densidad del aire ( $\delta$ )	0,954
Factor ambiental ( $m_t$ )	0,2
Factor superficial del conductor ( $m_c$ )	0,85
Gradiente crítico de Peek ( $E_c$ )	6,160 kV/cm
DMG	13,23 m
RMG	32,33 cm
$r_{eq}$	20,25 cm
Gradiente de tensión superficial ( $E$ ) <sup>11</sup>	54,82 kV/cm

#### 4.3.2. Método Peterson

**Tabla 16.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método Peterson.

Factor de forma del conductor ( $m_f$ )	0,9
Factor de corrección por el estado	0,9

<sup>11</sup> A condiciones normales de operación (teóricamente hablando, 20°C y 760 mm de Hg) el campo eléctrico generado no debe superar los 30 kV/cm dado que si esto sucede se presenta ruptura, por tal motivo no es coherente estimar pérdidas por efecto corona porque el gradiente crítico de Peek eficaz debería superar el gradiente de tensión superficial.

de la superficie del conductor ( $m_s$ )	
Gradiente de potencial ( $g_o$ )	21,471 kV/cm
Tensión crítica de corona ( $V_o$ )	417,157 kV
$V_f/V_o$	0,692
$\varphi$	0,01376
Pérdidas por efecto corona	0,152 kW/km-fase

### 4.3.3. Método EPRI

**Tabla 17.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método EPRI.

Radio corona ( $\rho$ )	43,4 cm
Capacitancia por fase ( $C_\varphi$ )	$1,3632 \times 10^{-11}$ F/fase
Campo eléctrico promedio ( $E$ )	15,75 kV/cm
Radio de la jaula equivalente ( $R_1$ )	74,6 cm
Factor electrogeométrico ( $k$ )	2,4
Pérdidas por efecto corona	55,063 kW/km-fase

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGÚN LA CONDICIÓN CLIMÁTICA

En el capítulo 4 se estiman las pérdidas por efecto corona de algunas configuraciones reales de líneas de transmisión, usando las metodologías explicadas en el capítulo 2 (metodología EPRI, Peterson y Peek). Dichos resultados fueron obtenidos bajo condiciones climáticas de lluvia y contrastados con los resultados obtenidos mediante el ejecutable explicado y detallado en el capítulo 3 (E\_corona); los resultados fueron muy similares, por ello para el estudio en condiciones de buen clima (ambiente seco), los cálculos se realizaron únicamente a través del programa E\_corona. Estos resultados, se presentan a continuación en las tablas 18, 19 y 20.

**Tabla 18.** Resultados de las pérdidas por efecto corona de la línea de transmisión de 115 kV.

Línea 115 kV	Pérdidas por efecto corona obtenidas del capítulo 4 en un ambiente de lluvia, kW/km	Pérdidas por efecto corona obtenidas del capítulo 3, kW/km (E_corona.m)	
		Lluvia	Buen clima <sup>12</sup>
<b>Método del EPRI</b>	0,655	0,655	-0,500
<b>Método de Peek</b>	0,796	0,796	No hay efecto corona
<b>Método de Peterson</b>	No hay efecto corona	No hay efecto corona	

<sup>12</sup> En el estudio de las pérdidas por efecto corona el término buen clima hace referencia a un ambiente seco, sin lluvia. Los resultados obtenidos en esta condición ambiental solo se estimaron por medio del programa E\_corona ya que se ha comprobado que dicho programa y la estimación paso a paso mostrada en el capítulo 4 presentan una variación mínima pero en teoría son los mismos resultados.

**Tabla 19.** Resultados de las pérdidas por efecto corona de la línea de transmisión de 230 kV.

Línea 230 kV	Pérdidas por efecto corona obtenidas del capítulo 4 en un ambiente de lluvia, kW/km	Pérdidas por efecto corona obtenidas del capítulo 3, kW/km (E_corona.m)	
		Lluvia	Buen clima
<b>Método del EPRI</b>	10,266	10,273	5,282
<b>Método de Peek</b>	7,590	7,584	No hay efecto corona
<b>Método de Peterson</b>	0,048	0,048	

**Tabla 20.** Resultados de las pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV.

Línea 500 kV	Pérdidas por efecto corona obtenidas del capítulo 4 en un ambiente de lluvia kW/km	Pérdidas por efecto corona obtenidas del capítulo 3, kW/km (E_corona.m)	
		Lluvia	Buen clima
<b>Método del EPRI</b>	55,063	55,117	14,031
<b>Método de Peek</b>	-----	-----	-----
<b>Método de Peterson</b>	0,152	0,150	

**5.1.1 Pérdidas por corona para mal clima o en ambiente de lluvia** Es notable que a la tensión de 115 kV la manifestación de efecto corona no sea visible si se realiza un buen diseño de la línea de transmisión, ahora bien, con base en la tabla 18 el resultado obtenido por el método Peterson es distinto a los otros dos, Peek y EPRI; esto se debe a que en su metodología, cuando el factor  $\varphi$  está por debajo del rango del estudio planteado por Peterson, (la relación de  $V_f/V_o$  es menor a

0,6) implica que no hay pérdidas, y como se observa en la sección 4.2.2, el factor  $\varphi$  está por debajo del rango de la figura 8.

En cuanto a las metodologías de EPRI y Peek, para el presente estudio se asume el caso más crítico y éste es el de clima lluvioso, motivo por el cual se consideran éstas como las metodologías más acertadas ya que tienen en cuenta un factor importante al momento de diseñar una línea de transmisión de alta tensión y es la condición atmosférica, contemplan el ambiente de un buen clima, un clima húmedo o en su defecto y en el peor de los casos, un clima con lluvia ya que las partículas o gotas de agua que quedan en los conductores empiezan a formar corona tal cual como se explicó en el capítulo 1 y al momento de realizar un diseño es importante tener en cuenta el caso desfavorable pensando en que en ciertos periodos del año el clima varía y las lluvias son fuertes.

Las pérdidas por transmisión en una línea se hacen proporcionales a la tensión y a la potencia transmitida por la misma, es por ello que los resultados obtenidos en la tabla 19 para una tensión de 230 kV son valores mayores en relación a los estimados para una tensión de 115 kV, pero con un comportamiento semejante en relación al resultado de cada método. Se logra observar resultados semejantes entre las metodologías EPRI y Peek, y distantes con respecto a la metodología Peterson, la cual a pesar de mostrar un incremento en comparación a la relación de los resultados obtenidos para la tensión de 115 kV, sigue siendo un valor bastante inferior; esto se debe no sólo a la falta de un factor climático del entorno en su expresión matemática, sino a los pasos que se deben aplicar para poder estimar un valor mediante dicho metodología. Si se observa con detenimiento el método de Peterson explicado en el capítulo 2, se puede evidenciar un margen de error en cada uno de los pasos, siendo al final un error relevante al realizar el proceso completo. Por ejemplo, el factor de corrección de la superficie del conductor no cuenta con un rango específico, sino que deja el valor final del mismo a criterio personal de quien realiza la estimación. Otro margen de error se puede presentar

al estimar el flujo a través de la relación entre la tensión crítica y la tensión de fase eficaz, flujo basado en una gráfica obtenida de valores empíricos y trabajos de laboratorio. Esta gráfica toma como valor inicial 0,6 despreciando valores menores y suponiendo que no se presentan pérdidas por efecto corona. Al igual que el valor estimado del flujo de la gráfica misma, no es más que un valor aproximado, con el margen de error que ello implica.

Para la línea de transmisión de 500 kV, los valores estimados y mostrados en la tabla 20 son muy distantes entre los tres métodos, siendo el método de Peterson el que menor pérdidas estima. Los métodos del EPRI y de Peek, aunque distantes entre sí, permiten observar un valor más próximo al esperado en líneas de transmisión de extra alta tensión debido a la gran potencia transmitida.

**5.1.2 Pérdidas por corona para buen clima o en ambiente seco** Para los resultados de una línea de 115 kV observados en la tabla 18, aplicar la metodología EPRI no se hace necesario ya que su resultado es negativo, esto se debe a que el campo eléctrico generado en el circuito es pequeño ya que el espaciamiento entre fases, el diámetro del conductor y las condiciones atmosféricas favorecen el sistema de transmisión logrando así unas mínimas pérdida, en conclusión, obtener un valor negativo implica que dichas condiciones están bien diseñadas logrando así que por esta metodología no se estimen pérdidas por efecto corona. En el caso de Peterson y Peek al suponer buen clima se evidencia que no se generan pérdidas por efecto corona.

**5.1.3 Pérdidas por corona para buen clima o en ambiente seco** Para los resultados de una línea de 115 kV observados en la tabla 18, aplicar la metodología EPRI no se hace necesario ya que su resultado es negativo, esto se debe a que el campo eléctrico generado en el circuito es pequeño ya que el espaciamiento entre fases, el diámetro del conductor y las condiciones atmosféricas favorecen el sistema de transmisión logrando así unas mínimas pérdida, en conclusión, obtener un

valor negativo implica que dichas condiciones están bien diseñadas logrando así que por esta metodología no se estimen pérdidas por efecto corona. En el caso de Peterson y Peek al suponer buen clima se evidencia que no se generan pérdidas por efecto corona.

En la línea de transmisión de 230 kV cuyos resultados se observan en la tabla 19, asumir unas condiciones meteorológicas de buen clima (ambiente seco) implica al igual que en cualquier nivel de tensión una disminución de pérdidas, para el presente estudio, disminución en pérdidas por efecto corona; con la metodología Peek no se generan pérdidas por corona dado a que el gradiente crítico de Peek ( $E_c$ ) eficaz es mayor que el gradiente de tensión superficial ( $E$ ), contrario sucede con EPRI, éste estima unas pérdidas que aunque sean pequeñas son considerables a la hora de realizar un diseño, con la metodología Peterson no se tiene variación dado a que este no diferencia un ambiente de lluvia a un ambiente seco.

Para la línea de transmisión de 500 kV se puede observar en sus resultados presentados en la tabla 20 una disminución significativa de pérdidas por efecto corona tanto en la metodología Peek como la del EPRI, esto se debe a que al transmitir mayor potencia a elevadas tensiones se generan campos eléctricos considerables y las pérdidas aumentan en proporción a la potencia, tensión y corriente; para este nivel de tensión se debe precisar que el efecto corona debe ser considerado al momento de realizar el diseño de una línea de transmisión y tener en cuenta el caso crítico ya que las pérdidas en estas condiciones aumentan más del doble que a condiciones de ambiente seco.

## 5.2. ANÁLISIS DE PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN COMPARACIÓN A LA POTENCIA TRANSMITIDA

Es válido señalar que realizar un buen diseño de una línea de transmisión donde se tenga en cuenta el efecto corona implica que éstas pérdidas independiente de las condiciones a las que se encuentre sometida tendrán un valor insignificante, las tablas 21 y 22 corroboran dicha afirmación ya que las pérdidas por corona no superan el 5 % de la potencia total transmitida.

**Tabla 21.** Resultados de las pérdidas por efecto corona en porcentaje en la línea de transmisión de 115 kV.

Tensión	Potencia Transmitida	Pérdidas totales <sup>13</sup>	Porcentaje <sup>14</sup>	Método
115 kV	126 MVA	134,603 kW	0,107 %	EPRI
		163,578 kW	0,130 %	Peek
		-----	-----	Peterson

**Tabla 22.** Resultados de las pérdidas por efecto corona en porcentaje en la línea de transmisión de 230 kV.

Tensión	Potencia Transmitida	Pérdidas totales	Porcentaje	Método
230 kV	278 MVA	1849,14 kW	0,665 %	EPRI
		1365,12 kW	0,491 %	Peek
		8,64 kW	0,003 %	Peterson

<sup>13</sup> Las pérdidas totales hacen referencia a las pérdidas calculadas y mostradas en las tablas 9, 10 y 11 pero multiplicándolas por la distancia total de la línea y por 3 evidenciando el circuito trifásico, se usaran las encontradas por el programa E\_corona.m (ambiente de lluvia) ya que este toma todos los decimales y en los cálculos realizados del capítulo 4 se tomaban solo los 3 primeros.

<sup>14</sup> El porcentaje hace referencia a realizar una regla de tres simple, se tiene la potencia transmitida y las pérdidas

En la tabla 23, para la línea de 500 kV se presenta un porcentaje significativo en el valor estimado mediante la metodología Peek, esto se debe, como lo menciona el libro *Transmission Line Reference Book*, a que el aplicar este método a tensiones elevadas resulta poco fiable dado la metodología está fundamentada en experimentos para tensiones de 200 kV .

**Tabla 23.** Resultados de las pérdidas por efecto corona en porcentaje en la línea de transmisión de 500 kV.

<b>Tensión</b>	<b>Potencia Transmitida</b>	<b>Pérdidas totales</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Método</b>
500 kV	1.985 MVA	30.755,286 kW	1,549 %	EPRI
		172,216 MW	8,676 %	Peek
		83,7 kW	0,004%	Peterson

En un sistema de transmisión las pérdidas más significativas son las producidas por el efecto Joule, restando importancia en relación a las pérdidas por efecto corona. Esto conlleva a asegurar que en una línea de transmisión real y actualmente activa, no se va a encontrar unas pérdidas por efecto corona cercanas o superiores al 10%.

### **5.3. ANÁLISIS DE LOS FACTORES “m” EN LA ESTIMACIÓN DE LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LA METODOLOGÍA PEEK Y PETERSON**

Las metodologías planteadas por Peek y por Peterson conllevan unos factores m que afectan la estimación de las pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión, a continuación se muestra el comportamiento de la variación de cada factor m respecto a las pérdidas totales de las líneas de transmisión.

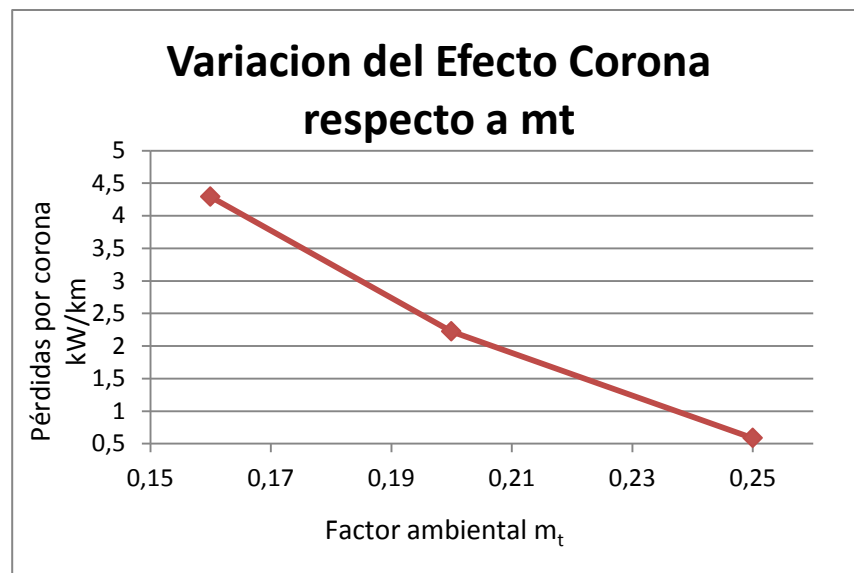
### 5.3.1. Análisis de la metodología Peek.

#### Resultados para 115 kV

**Tabla 24.** Variación del factor ambiental  $m_t$  en la estimación del efecto corona para 115 kV.

$m_t$	$m_c$	$E_c$ [kV/cm]	$E$ [kV/cm]	$\frac{E_c}{\sqrt{2}}$ [kV/cm]	Efecto corona para 115 kV en [kW/km]
0,16	0,85	5,147	9,739	3,639	4,2915
0,2	0,85	6,433	9,739	4,549	2,2236
0,25	0,85	8,042	9,739	5,686	0,5862
0,8	0,85	25,73	9,739	18,19	--
1	0,85	32,16	9,739	22,746	--

**Figura 13.** Comportamiento del factor  $m_t$  en la estimación del efecto corona para 115 kV.



**Tabla 25.** Resultados de estimar el efecto corona variando  $m_c$  a la línea de transmisión de 115 kV.

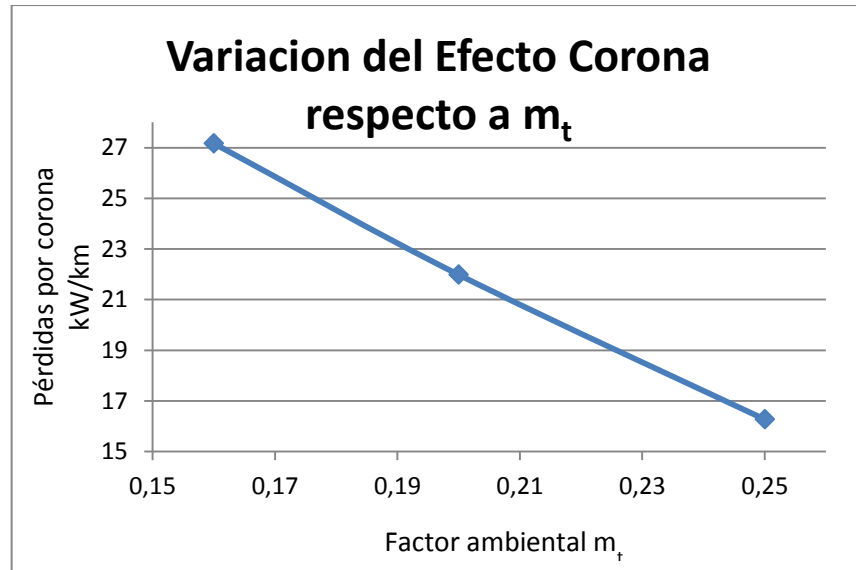
$m_t$	$m_c$	$E_c \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	$E \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	$\frac{E_c}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	Efecto corona para 115 kV en [kW/km]
0,8	0,5	15,043	9,7395	10,704	--
0,8	0,6	18,051	9,7395	12,845	--
0,8	0,7	21,059	9,7395	14,986	--
0,8	0,8	24,068	9,7395	17,127	--
0,8	0,9	27,077	9,7395	19,267	--
0,8	1	30,085	9,7395	21,408	--

### Resultados para 230 kV

**Tabla 26.** Resultados de variar  $m_t$  para estimar las pérdidas por efecto corona en 230 kV.

$m_t$	$m_c$	$E_c \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	$E \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	$\frac{E_c}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	Efecto corona para 230 kV en [kW/km]
0,16	0,85	5,114	17,838	3,6165	27,171
0,2	0,85	6,393	17,838	4,5206	21,984
0,25	0,85	7,991	17,838	5,6507	16,273
0,8	0,85	25,572	17,838	18,082	
1	0,85	31,965	17,838	22,603	

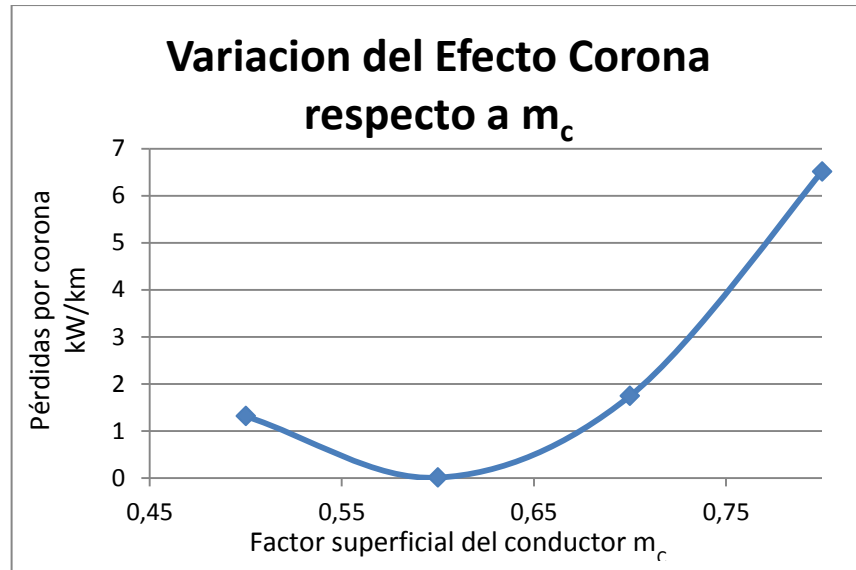
**Figura 14.** Variación del efecto corona respecto a  $m_t$ .



**Tabla 27.** Variación del factor superficial  $m_c$  para estimar las pérdidas por efecto corona en 230 kV.

$m_t$	$m_c$	$E_c \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	$E \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	$\frac{E_c}{\sqrt{2}} \left[ \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right]$	Efecto corona para 230 kV en [kW/km]
0,8	0,5	15,0427	17,838	10,6367	1,3115
0,8	0,6	18,051	17,838	12,7641	0,0076
0,8	0,7	21,059	17,838	14,8915	1,7420
0,8	0,8	24,068	17,838	17,0188	6,5147
0,8	0,9	27,077	17,838	19,1462	
0,8	1	30,085	17,838	21,2735	

**Figura 15.** Variación del efecto corona respecto a  $m_c$ .



En general puede observarse que al aumentar el factor ambiental  $m_t$  o el factor superficial del conductor  $m_c$  las pérdidas por efecto corona disminuyen, estos factores están ligados al cálculo del gradiente crítico de Peek (Ecuación 1) y es evidente que si uno de los dos factores aumenta  $E_c$  lo hará directamente implicando que al usar la siguiente comparación de Peek:

$$\frac{E_c}{\sqrt{2}} > E$$

Se logre veracidad y se eviten pérdidas por efecto corona, otro detalle es que llegado el caso la anterior comparación no sea válida implica que hay pérdidas por corona y es cuando se usa la ecuación 13; en el presente análisis y específicamente hablando para la línea de transmisión de 230 kV cuando se varia  $m_c$  se obtiene un comportamiento distinto a los demás, la razón es validada por investigaciones de *Transmission Line Reference Book*<sup>15</sup> en donde afirman que Peek no se

<sup>15</sup> EPRI – Transmission Line Reference Book. Pagina 730

aplica cuando el gradiente crítico es ligeramente igual al gradiente de tensión superficial. [1]

### 5.3.2. Análisis de la metodología Peterson.

El factor  $m_s$  representa el factor de corrección por el estado de la superficie del conductor y el factor  $m_f$  representa el factor de forma del conductor; dichos factores toman valores empíricos asignados a través de diversos estudios e investigaciones, y tienen incidencia directa sobre el cálculo de la tensión crítica de corona.

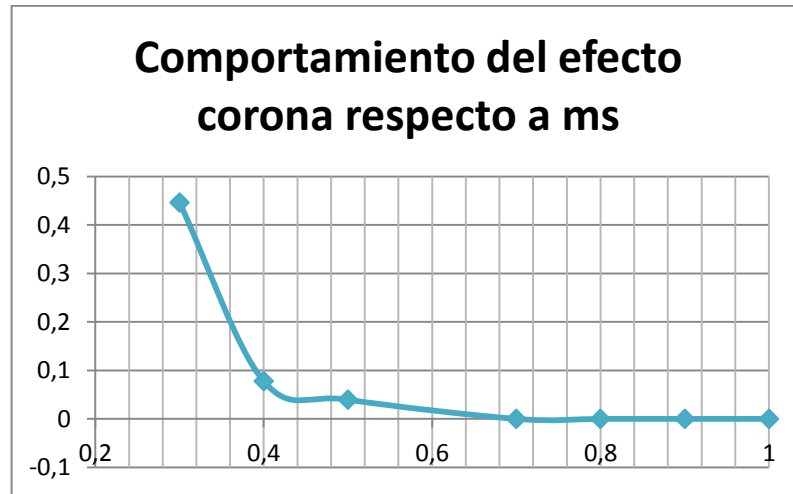
En las siguientes tablas se observa el comportamiento de la tensión crítica en relación a la variación del factor  $m_s$ , (se puede esperar un comportamiento muy similar a la variación del factor  $m_f$  debido a la analogía matemática tácita de la fórmula). Dicha tensión crítica es empleada para el cálculo del flujo a través de la figura 8 (función de Peterson para el cálculo del flujo), el cual es empleado en la ecuación desarrollada para obtener las pérdidas por efecto corona.

#### Análisis para 115 kV

**Tabla 28.** Resultados de variar el factor  $m_s$  en la estimación de las pérdidas por efecto corona.

$m_s$	$g_o$	$V_o$ [kVrms]	$\frac{V_f}{V_o}$	$\varphi$	$P \left[ \frac{\text{kW}}{\text{km}} \right]$
1	24,673	168,198	0,3947	0	0
0,9	22,206	151,378	0,4386	0	0
0,8	19,738	134,557	0,4934	0	0
0,7	17,271	117,739	0,56392	0	0
0,5	12,336	84,0992	0,78949	0,01758	0,03963
0,4	9,8692	67,279	0,98686	0,03455	0,07789
0,3	7,4019	50,459	1,31581	0,19791	0,44617

**Figura 16.** Comportamiento de  $m_s$  en la estimación del efecto corona

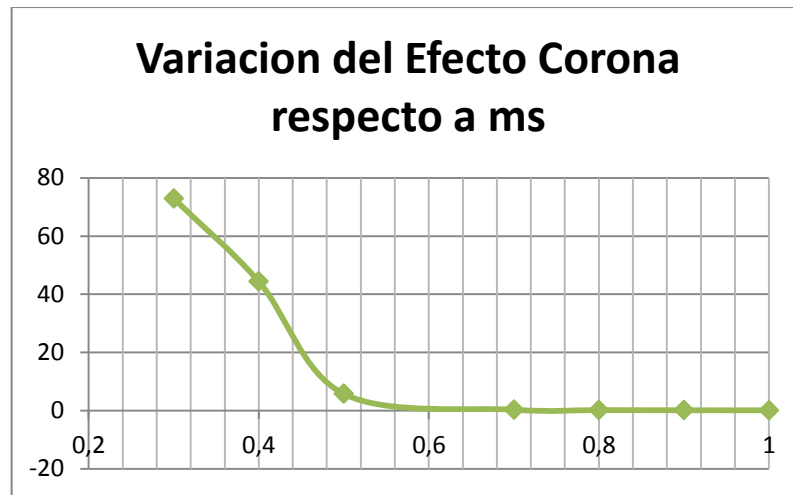


### Análisis para 230 kV

**Tabla 29.** Resultados de variar el factor  $m_s$  en la estimación de las pérdidas por efecto corona.

$m_s$	$g_o$	$V_o$ [kVrms]	$\frac{V_f}{V_o}$	$\phi$	$P$ $\left[\frac{\text{kW}}{\text{km}}\right]$
1	24,556	182,799	0,726	0,015	0,1138
0,9	22,100	164,519	0,807	0,018	0,1399
0,8	19,645	146,239	0,908	0,026	0,1957
0,7	17,189	127,959	1,038	0,042	0,3207
0,5	12,2780	91,399	1,453	0,761	5,7544
0,4	9,82240	73,119	1,816	5,868	44,3807
0,3	7,36680	54,839	2,421	9,642	72,9221

**Figura 17.** Comportamiento de  $m_s$  en la estimación del efecto corona

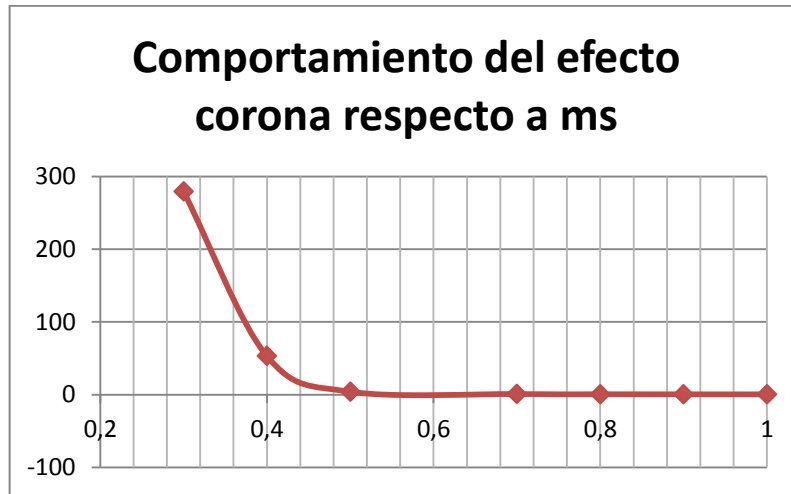


### Análisis para 500 kV

**Tabla 30.** Resultados de variar el factor  $m_s$  en la estimación de las pérdidas por efecto corona.

$m_s$	$g_o$	$V_o$ [kVrms]	$\frac{V_f}{V_o}$	$\phi$	$P$ $\left[ \frac{\text{kW}}{\text{km}} \right]$
1	24,1403	469,018	0,61548	0,01146	0,394
0,9	21,7262	422,116	0,68387	0,01351	0,465
0,8	19,3122	375,214	0,76935	0,01677	0,577
0,7	16,8982	328,313	0,87926	0,02354	0,810
0,5	12,0701	234,509	1,23097	0,1152	3,968
0,4	9,65612	187,607	1,53871	1,54234	53,127
0,3	7,24209	140,705	2,05162	8,10975	279,346

**Figura 18.** Comportamiento de  $m_s$  en la estimación del efecto corona



Para valores de  $m_s$  cercanos a uno, es decir cuando el conductor se encuentra en óptimas condiciones o próximo a ellas, la tensión crítica tiende a ser mucho mayor que la tensión eficaz, por lo cual la relación da un valor pequeño logrando minimizar las pérdidas por corona. En cambio, para cuando las condiciones de la superficie del conductor son las menos ideales, y entre más desfavorables sean (sucias, engrasadas o húmedas), la tensión crítica disminuirá incluso a valores menores que la tensión eficaz, generando un flujo mayor, lo cual a su vez conllevará a un aumento en las pérdidas.

Es claro que a una mayor tensión transmitida, existe una mayor potencia a transmitir, razón por la cual se puede esperar que las pérdidas en las líneas sean mayores a las presentadas por una potencia y una tensión menor.

Al momento de realizar un diseño de una línea de transmisión y en general de cualquier diseño siempre se debe considerar el caso crítico, específicamente para efecto corona dicho caso es el de lluvia.

## 6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS METODOLOGÍAS EPRI, PETERSON Y PEEK

En el presente capítulo se mostraran las características generales de cada método para la estimación de las pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión en alta tensión, posteriormente a ello se evidenciarán las ventajas y desventajas que presenta cada uno de ellos.

Cada metodología tiene su propia expresión matemática, conformada por diversos parámetros. En la tabla 31 se presenta de forma general los parámetros requeridos para el uso de los métodos Peek, Peterson y EPRI.

**Tabla 31.** Parámetros requeridos por los métodos EPRI, Peterson y Peek.

Parámetros	EPRI	PETERSON	PEEK
Tensión de la línea [kV]	X	X	X
Número de circuitos	X	X	X
Número de conductores por fase	X	X	X
Separación entre subconductores de una fase [cm]	X	X	X
Radio del conductor [cm]	X	X	X
Estado del clima	X		
Factor ambiental ( $m_t$ )			X
Factor superficial ( $m_c$ )			X
ASNM [m] o Presión barométrica [cm de Hg]		X	X
Temperatura ambiente [°C]		X	X
Factor de forma del conductor ( $m_f$ )		X	
Estado superficial del conductor ( $m_s$ )		X	
Flecha [m]		X	

Los métodos Peterson y Peek en la actualidad han sido usados a nivel mundial, el porqué de su uso se refleja en el hecho de que al usarlos en el diseño de líneas de transmisión, éstas al entrar en operación cumplen los requisitos mínimos de funcionamiento, siendo así, una garantía de que el diseño fue viable y funcionable cuando se realiza la puesta en marcha del proyecto. La metodología EPRI estudiada en el presente proyecto es muy usada en Estados Unidos dado a que se han realizado inmensos estudios en el tema, la salvedad es que los parámetros plantados se han adaptado a las condiciones colombianas, esto se muestra en las tablas 7 y 8.

Resaltando las ventajas y desventajas de cada método con ayuda de la tabla 31 se puede concluir:

- Los métodos EPRI y Peek tienen en cuenta las condiciones meteorológicas, ambientales o atmosféricas que rodea la línea de transmisión, esto se evidencia en EPRI con la tabla 8, la cual está diseñada únicamente para condiciones de lluvia, para condiciones de buen clima las ecuaciones cambian y es válido mencionar tal cual como se dijo en el análisis de los resultados (Capítulo 5) que las pérdidas se hacen considerables en ambientes críticos, es decir, de lluvia; en Peek se refleja al calcular el gradiente crítico, éste tiene en su fórmula el factor ambiental  $m_t$  que está ligado a dichas condiciones atmosféricas mencionadas.
- Un factor que aumenta las pérdidas por efecto corona es la condición superficial del conductor, Peterson y Peek tienen en cuenta este fenómeno, mientras que la metodología EPRI no contempla las condiciones del conductor; en Peterson este hecho se ve reflejado en el factor superficial del conductor ( $m_s$ ), el cual tiene unos valores mencionados en la tabla 4; Peek tiene en cuenta esta

condición del conductor en su factor superficial ( $m_c$ ), sus valores, dependiendo el caso se detallan en la tabla 3.

- En la puesta en servicio de una línea de transmisión es importante conocer qué tipo de conductor se utilizará, no solamente su radio si no las condiciones de forma, en este aspecto los métodos que tienen en cuenta dichas características son Peterson y Peek, mientras que EPRI tiene en cuenta únicamente el radio del conductor sin precisar su forma, dado que entre más circular sea el conductor, menos contaminación puede acumular y por ende sus pérdidas se reducirán. [1]
- EPRI presenta una desventaja considerable en comparación con Peek y Peterson, ya que esta metodología no tiene en cuenta la altura sobre el nivel del mar de la línea ni la presión barométrica, dicho dato implica humedad relativa en el ambiente, a menor altura o mayor presión, es mayor temperatura y por ende es mayor humedad relativa en la zona que rodea el conductor. Se puede asegurar que la humedad afecta las pérdidas por efecto corona, primero porque una humedad más alta suprime avalanchas de electrones, y segundo porque crea una mayor concentración de vapor de agua en el conductor y esto genera más puntos corona, aumentando las pérdidas. [1]
- EPRI tiene en cuenta la condición del ambiente, es lluvia o es buen clima pero algo que omite es la temperatura a la que está sometida la línea de transmisión cosa que no sucede con los métodos de Peterson y de Peek, y como se mencionó anteriormente, a mayor temperatura, mayor humedad y por ende las pérdidas por corona aumentan.
- Una seria desventaja de la metodología Peek es lograr que el gradiente de tensión superficial ( $E$ ) y el gradiente crítico de Peek ( $E_c$ ) sean casi iguales, matemáticamente hablando si se logra dicha igualdad las pérdidas por corona se

hacen nulas, sin embargo cuando las líneas se encuentran en operación se obtienen resultados diferentes a los esperados matemáticamente. Esto se puede observar en las investigaciones del Electric Power Research Institute.

- La principal desventaja de la metodología de Peek es que su expresión matemática fue desarrollada de forma empírica bajo tensiones de operación cercanas a los 200 kV, por ello sus estimaciones no son recomendables para estudios en líneas de transmisión cuya tensión de operación sea considerablemente superior.

## 7. CONCLUSIONES

- Para el diseño de líneas de transmisión, principalmente en alta y extra alta tensión se debe tener presente las pérdidas que se generan por efecto corona, ya que a mayores tensiones dichas pérdidas aumentan de forma considerable; si no se tiene en cuenta este fenómeno la línea se verá afectada en su funcionamiento y su vida útil.
- Si no se tiene en cuenta el efecto corona en la transmisión de energía eléctrica, la potencia al usuario se verá afectada por diversos factores tales como ruido audible, perturbaciones a frecuencias de radio y televisión, generación de ozono, viento iónico y en general pérdidas de energía en mayor o menor cantidad dependiendo de las condiciones que se resume en degradación de la transmisión de potencia.
- Al momento de realizar el diseño de una línea de transmisión, éste se debe realizar con base en las condiciones más desfavorables, tanto climáticas como propias del conductor. Esto se realiza con el fin de poder estimar las pérdidas bajo la peor situación, de esta manera cuando la línea se encuentre en operación, se obtendrán pérdidas menos significativas a las estimadas.
- Las pérdidas presentadas por efecto corona dependen de varios factores y parámetros independientes unos de otros, algunos pueden ser corregidos de forma directa por el diseñador y operador de la línea, con base en una buena proyección y selección de los elementos propios de la línea, y de un excelente y periódico mantenimiento de la misma.
- El que un método matemáticamente dependa de más variables y cuente dentro de sus análisis con un mayor número de parámetros externos no asegura mayor precisión en su estimación, pues dependiendo directamente del criterio de

selección de cada variable, el rango de error obtenido como resultado final de dicha metodología varía significativamente.

- Se debe tener presente que una línea de transmisión en una zona con temperaturas altas sufre más las pérdidas por efecto corona que una existente en temperaturas bajas dado a que a mayor temperatura, mayor humedad relativa. Este hecho se da porque el vapor de agua actúa como un gas electronegativo que permite capturar electrones para las moléculas de agua logrando así que se supriman avalanchas de electrones y se cree una mayor concentración de vapor de agua en el conductor, generando más puntos irregulares que se pueden convertir en puntos corona, aumentando las pérdidas.
- Para estimaciones sobre pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión cuya tensión de operación sea cercana a los 115 kV, en un ambiente de buen clima se aprecian resultados similares en los tres métodos. Mientras que para ambiente de lluvia y condiciones más desfavorables los métodos que mostraron una mejor estimación fueron EPRI y Peek, debido a que dentro de su metodología consideran de forma directa el entorno climático a través de factores estipulados.
- Para estimaciones sobre pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión cuya tensión de operación sea cercana a los 230 kV, en un ambiente de buen clima se aprecian valores cercanos y aceptables para las tres metodologías, puesto que a pesar de la discrepancia entre el método Peek estimando la ausencia de pérdidas por corona y los métodos EPRI y Peterson estimando valores de pérdidas por corona, éstos valores son casi insignificantes y se aproximan a unas pérdidas despreciables. Ya en condiciones climáticas desfavorables, se recomienda emplear la metodología de EPRI y Peek, pues la metodología de Peterson no contempla dichas condiciones en sus planteamientos matemáticos.

- No se aconseja emplear la metodología de Peek para estimaciones de pérdidas por efecto corona en operaciones cercanas a los 500 kV, pues sus expresiones matemáticas se plantearon de forma empírica bajo operaciones cercanas e inferiores a los 200 kV.

## 8. RECOMENDACIONES

- Actualmente la legislación colombiana no tiene certeza de cuánto debe ser el porcentaje de pérdidas por efecto corona en una línea de transmisión, queda en duda si los diseños existentes en el sistema de transmisión nacional están adecuados a las condiciones que diariamente se presentan, por este motivo sería bueno indagar las líneas en operación y saber de cuánto fue el criterio de aceptación para dichas pérdidas.
- La metodología EPRI planteada en el presente proyecto se limita a ciertas configuraciones de conductores en haz, la razón se debe a que en su momento el ingeniero Julio Rúgeles Jones estimó los parámetros para un limitado número de conductores y de combinaciones de conductores en cada fase, como se observa en las tablas 7 y 8. Se recomienda ampliar estas combinaciones.
- Los factores implicados en la estimación de pérdidas por efecto corona de las metodologías Peek y Peterson siguen siendo subjetivas a la hora de realizar un diseño de una línea de transmisión, es recomendable profundizar dicha investigación y lograr una objetividad de los parámetros, aun cuando se sabe que estos existen en las fórmulas para adaptar a los medios expuestos de las líneas.
- El programa de computador E\_corona estima pérdidas por efecto corona en las líneas de transmisión, se aconseja contrastar los resultados con valores reales e indagar si las empresas actuales de transmisión de energía poseen información y mediciones sobre efecto corona.
- La industria dedicada al sector de transmisión de energía realiza sus proyectos con software, evidentemente el manejo de estos programas los realizan personas capacitadas pero muchas de ellas ignoran cómo se realiza el cálculo de las

pérdidas por corona, simplemente dan unos datos para obtener unos resultados, hasta la fecha las líneas de transmisión en operación funcionan de forma correcta, la cuestión es, qué metodología tienen en cuenta a la hora de tener presente las pérdidas por corona.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EPRI. Project UHV. *Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above, Third Edition*. California. December 2005. 1074p.
- [2] TEJADA MARTÍNEZ, Carlos. Análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en C.A. México D.F., Junio 2008.120p.Trabajo de investigación (Maestro en ciencias con especialidad en ingeniería eléctrica). Instituto Politécnico Nacional.
- [3] MENA ARIAS, Byron. Efecto corona en líneas de transmisión de 500 kV. Quito, Julio 2008. 189p. Trabajo de investigación (Ingeniero electricista). Escuela Politécnica Nacional.
- [4] RÚGELES, Julio., CHACÓN, Julio. Manual de laboratorio de alta tensión – Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011. 153p.
- [5] RÚGELES, Julio. Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallaada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa). Bucaramanga. 1995.125p. Informe final investigación de Colciencias.
- [6] FUENTES, Alvaro., PERICO, Rito. Campo eléctrico en líneas de alta tensión. Comparación crítica de sus valores límites de exposición teniendo como referencia la normatividad colombiana. Bucaramanga, 2011. 236p. Trabajo de investigación (Ingeniero electricista). Universidad Industrial de Santander.
- [7] ZAMBRANO, Ramón. Estudio de la factibilidad del modelado del efecto corona en una línea de transmisión usando un modelo a escala. Mérida, Marzo 2007. 92p. Trabajo de investigación (Ingeniero electricista). Universidad de los Andes.

[8] BUENAVENTURA, Julitza., VELÁSQUEZ, María. Pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV Quito – Guayaquil. Guayaquil 2011. 185p. Trabajo de investigación (Ingeniería en electricidad, especialización Potencia). Escuela Superior Politécnica del Litoral.

[9] BEGAMUDRE, Rakosh Das. Extra high voltage AC transmission engineering. New York. John Wiley & sons; 1986. 460 p.

## BIBLIOGRAFÍA

BUENAVENTURA, Julitza., VELÁSQUEZ, María. Pérdidas por efecto corona en la línea de transmisión de 500 kV Quito – Guayaquil. Guayaquil 2011. 185p. Trabajo de investigación (Ingeniería en electricidad, especialización Potencia). Escuela Superior Politécnica del Litoral.

EPRI. Project UHV. *Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above, Third Edition*. California. December 2005. 1074p.

FUENTES, Alvaro., PERICO, Rito. Campo eléctrico en líneas de alta tensión. Comparación crítica de sus valores límites de exposición teniendo como referencia la normatividad colombiana. Bucaramanga, 2011. 236p. Trabajo de investigación (Ingeniero electricista). Universidad Industrial de Santander.

MATWORKS. Creating a GUI with Guide {en línea}{5 de Agosto de 2014}. Disponible en internet: <http://www.mathworks.com/videos/mtlab/creating-a-gui-with-guide.html>

MEJÍA, Ana. Análisis técnico y económico de la repotenciación de líneas aéreas de alta tensión en un sistema de subtransmisión. Codensa S.A. ESP. Trabajo de investigación. Universidad Tecnológica de Pereira.

MENA ARIAS, Byron. Efecto corona en líneas de transmisión de 500 kV. Quito, Julio 2008. 189p. Trabajo de investigación (Ingeniero electricista). Escuela Politécnica Nacional.

PEEK, F. Comparison of calculated and measured corona loss curves. AIEE. New York. February 17, 1915. 10p.

PEEK, F. The law of corona and the dielectric strength of air. AIEE. Chicago. June 29, 1911. 77p.

PETERSON, W. (Discussion) in: Carrol, J.S. and B. Cozzens. Corona loss measurements for the design of transmission lines to operate at voltages between 200 kV and 300 kV. AIEE transactions. Vol. 52. Pp. 55-63. Marzo 1933. 8p.

ROMAN, Francisco., CASTILLO, Gustavo. Metodología para la evaluación de pérdidas corona en líneas de transmisión. Colombia. 10p.

RÚGELES, Julio. Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa). Bucaramanga. 1995.125p. Informe final investigación de Colciencias.

RÚGELES, Julio., CHACÓN, Julio. Manual de laboratorio de alta tensión – Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011. 153p.

SAEZ, Omar. Comparación de los métodos de Peterson y EDF para el cálculo de las pérdidas corona en líneas de tensión inferior a 220 [kV]. Ecuador. Junio 2000. 7p.

SARMIENTO, Edna., OVIEDO, Gerson. Actualización del “Manual de laboratorio de alta tensión” de la Universidad Industrial de Santander. Trabajo de grado (Ingeniero electricista). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2011. 153p

TEJADA MARTÍNEZ, Carlos. Análisis de la interferencia electromagnética por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión en C.A. México D.F., Junio 2008.120p.Trabajo de investigación (Maestro en ciencias con especialidad en ingeniería eléctrica). Instituto Politécnico Nacional.

## **ANEXOS**

### **Anexo A. Manual de usuario de E\_corona**

#### **Manual de usuario**

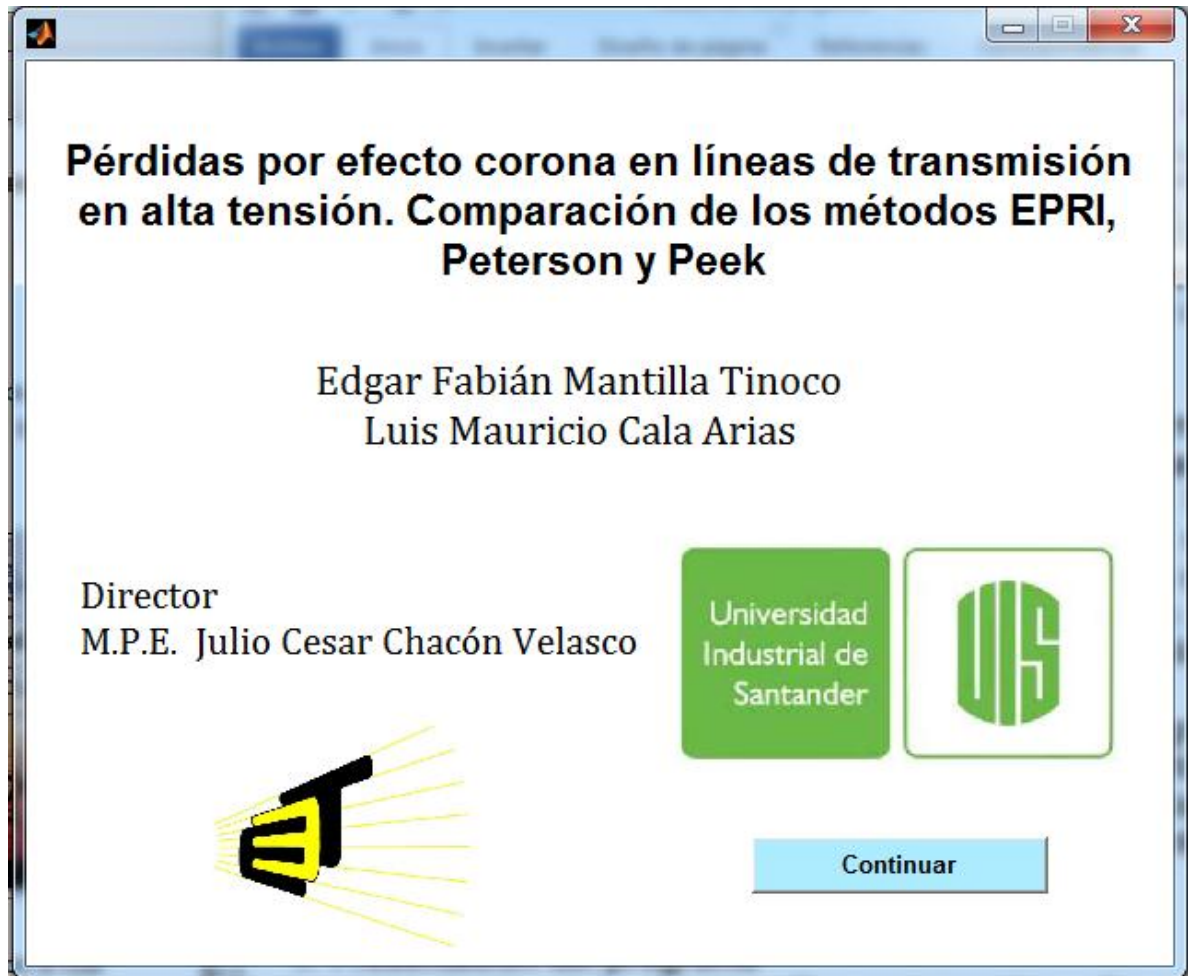
El programa E\_corona realiza la estimación de las pérdidas por efecto corona en una línea de transmisión, dicha estimación se hace por 3 diferentes metodologías, EPRI, Peterson y Peek; adicionalmente el calcula la capacitancia por fase y los campos existentes en cada fase del circuito.

E\_corona está guardado en un archivo .m en lenguaje del ambiente de programación MATLAB, por lo cual, para obtener su funcionamiento es necesario llamarlo desde el mismo programa MATLAB. Adicionalmente a esto y por facilidad del usuario se realizó la compilación del archivo (como se explicó en el capítulo 3) quedando E\_corona en forma de ejecutable o .exe, esto con el fin de poder correrlo desde cualquier ordenador que no tenga instalado MATLAB.

Para el funcionamiento del programa el usuario debe ingresar una serie de datos, posteriormente a esto se selecciona los métodos para obtener la respuesta, igualmente se hace con la capacitancia por fase y el campo eléctrico. Este programa también genera una gráfica de la posición ingresada de las fases del circuito o los circuitos.

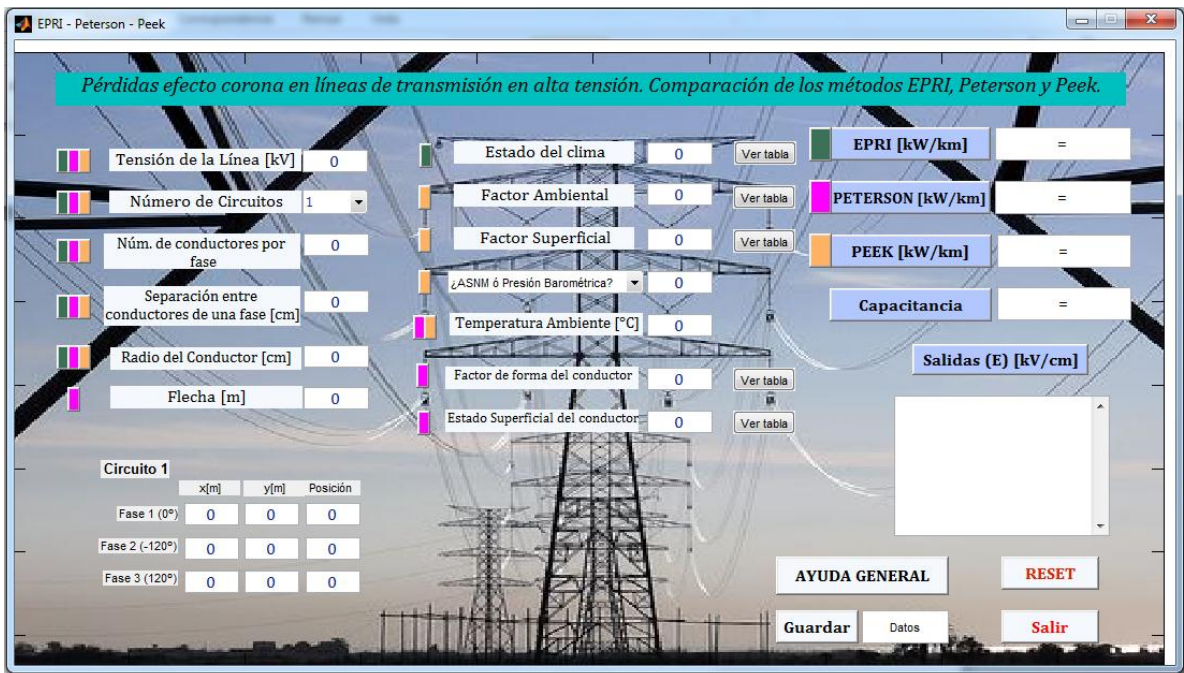
## 1. Presentación del programa

La presentación del programa E\_corona contiene 2 ventanas de usuario. La primera es la presentación, en donde se encuentra el título del proyecto, los nombres de los autores y del director del proyecto.

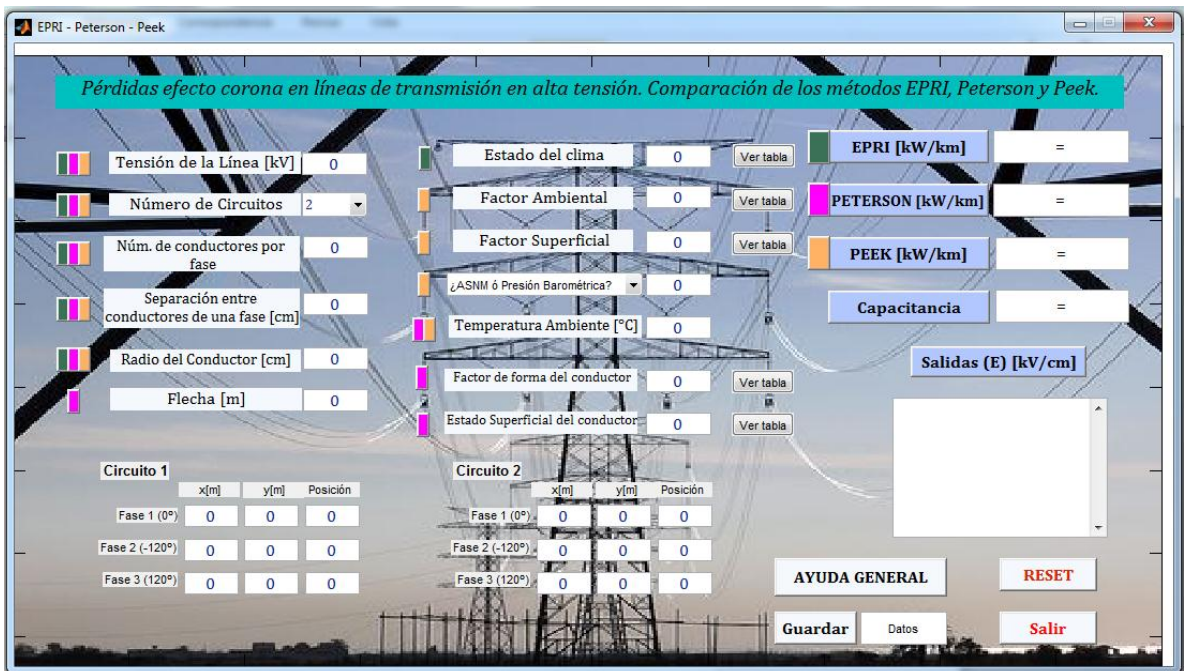


En esta ventana hay un pushbutton llamado **Continuar**, el cual ingresa a la siguiente ventana de usuario.

El ejecutable tiene una característica visual, cuando se selecciona el **Número de conductores**, si el valor es 1 la ventana aparece de la siguiente manera:



Cuando **Número de conductores** es igual a 2 aparece una nueva entrada, **Circuito 2**; el programa tiene este aspecto:



## **2. Entrada de datos**

### **2.1. Tensión de la línea [kV]**

Se debe digitar la tensión de operación línea-línea del sistema en kilovolts.

### **2.2. Número de circuitos**

El programa se limita a máximo 2 circuitos por torres, dada esta condición el ejecutable pide seleccionar 1 o 2 circuitos.

### **2.3. Número de conductores por fase**

Se debe digitar el número de conductores que están en la fase del circuito, para estimar pérdidas por efecto corona el método EPRI tiene restricciones que se pueden observar en la tabla 7 y 8.

### **2.4. Separación entre conductores de una fase [cm]**

Si número de conductores por fase es mayor a 1 se debe ingresar el dato de la separación entre conductores de la fase, si número de conductores por fase es 1 se deja en cero esta casilla.

### **2.5. Radio del conductor [cm]**

Se debe diligenciar el radio del conductor del circuito.

### **2.6. Estado del clima**

Esta opción se limita a 0 o 1, al lado de esta entrada hay una opción llamada **Ver tabla**, esta especifica las condiciones para saber cuál opción diligenciar.

### **2.7. Factor ambiental**

Para diligenciar el valor del factor ambiental se debe observar una tabla mostrada al lado de esta entrada.

### **2.8. Factor superficial**

El factor superficial tiene unos rangos mostrados en la opción **Ver tabla** que se encuentra al lado de esta entrada.

### **2.9. ¿ASNM [m] o Presión Barométrica [cm de Hg]?**

En ocasiones el usuario puede tener la altura sobre el nivel del mar o la presión barométrica, por tal razón está la opción de seleccionar alguna de las dos e ingresar su valor.

### **2.10. Temperatura ambiente [°C]**

Se debe ingresar la temperatura ambiente del circuito.

### **2.11. Factor de forma del conductor**

Para diligenciar el factor de forma del conductor se debe observar la tabla que aparece al lado de esta entrada.

### **2.12. Estado superficial del conductor**

El estado superficial del conductor tiene unos valores específicos, esta información se encuentra en la opción **Ver tabla** que se encuentra al lado de la entrada.

### **2.13. Flecha [m]**

Cuando el **Núm. De conductores por fase** es igual a 1 la entrada flecha se deja en blanco o con 0, si su valor es distinto y mayor a 1 se debe ingresar el valor de la flecha.

### 3. EPRI [kW/km]

Una vez diligenciados los datos de ingreso se selecciona el pushbutton **EPRI [kW/km]** para mostrar el valor de la estimación del efecto corona por la metodología EPRI.

### 4. PETERSON [Kw/KM]

Una vez diligenciados los datos de ingreso se selecciona el pushbutton **PETERSON [Kw/KM]** para mostrar el valor de la estimación del efecto corona por la metodología Peterson.

### 5. PEEK [Kw/KM]

Una vez diligenciados los datos de ingreso se selecciona el pushbutton **PEEK [Kw/KM]** para mostrar el valor de la estimación del efecto corona por la metodología Peek.

### 6. Capacitancia [F/m]

El pushbutton **Capacitancia [F/m]** muestra la capacitancia por fase de la línea de transmisión, para calcular dicho valor únicamente se deben llenar los campos de tensión, número de conductores por fase, radio del conductor y la posición de cada fase en el plano xy.

### 7. Salidas (E) [kV/cm]

El pushbutton **Salidas (E) [kV/cm]** muestra los resultados de los campos eléctricos de cada fase del circuito en estudio, si el número de circuitos es igual a 1 se muestran 3 campos, si el número de circuitos es igual a 2 se muestran 6 campos eléctricos.

## 8. NOTA

- Para correr el programa E\_corona es necesario instalar el MCRInstaller que permitirá ejecutar las operaciones internas, en la carpeta EJECUTABLE está el programa E\_corona y 2 archivos de MCRInstaller, el de 32 bits y el de 64 bits, primordialmente instalar el de 32 bits pero si el ordenador tiene procesador AMD de 64 bits instalar el MCRInstaller 64 bits.
- En algunos casos no se generan pérdidas por efecto corona en las líneas de transmisión, cuando esto sucede el programa E\_corona muestra en su salida un mensaje de: No hay efecto corona, en la metodología EPRI se tienen limitaciones en el radio del conductor y el número de conductores por fase, esto se especifica en las tablas 7 y 8. Cuando la configuración y los datos de la línea se salen de las limitaciones el método EPRI muestra un mensaje que dice: No calculable.

## Anexo B. Lenguaje de Programación de E\_corona

### Lenguaje para la ventana de presentación

```
function varargout = GUI_pres(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @GUI_pres_OpeningFcn,
                  ...
                  'gui_OutputFcn',  @GUI_pres_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function GUI_pres_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
    clc;
    im=imread('Logo_UIS.png');
    axes(handles.axes1);
    imshow(im);
    im2=imread('e3t.JPG');
    axes(handles.axes3);
    imshow(im2);

%     fondot=imread('torres transmission.JPG');
%     axes(handles.axes2);imshow(fondot);

% Choose default command line output for GUI_pres
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes GUI_pres wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
```

```

% --- Outputs from this function are returned to the command
line.
function varargout = GUI_pres_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout    cell array for returning output args (see
VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
close all force;
GUI

% --- Executes on key press with focus on pushbutton1 and
none of its controls.
function pushbutton1_KeyPressFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    structure with the following fields (see UICON-
TROL)
%   Key: name of the key that was pressed, in lower case
%   Character: character interpretation of the key(s) that
was pressed
%   Modifier: name(s) of the modifier key(s) (i.e., control,
shift) pressed
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

## Lenguaje de programación para la ventana de datos

```
function varargout = GUI(varargin)
```

```

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

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

function GUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
clc; disp('Inicio ...');
% % fondo
fondot=imread('torres transmision.JPG');
axes(handles.axes1);imagesc(fondot);

set(handles.uipanel12,'Visible','off');
set(handles.uipanel10,'Visible','off');
set(handles.pushbutton60,'Visible','off')

handles.v_inicial=115;

% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)
% varargin     command line arguments to GUI (see VARARGIN)

% Choose default command line output for GUI
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

```

```

% UIWAIT makes GUI wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command
line.
function varargout = GUI_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout    cell array for returning output args (see
VARARGOUT);
% hObject     handle to figure
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
handles.v_inicial = str2double(get(hObject,'String'));

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

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as
text
%           returns contents of edit1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('AYUDA GENERAL.pdf')
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit9 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

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

```

```

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit8 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit3 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% contents = cellstr(get(hObject,'String'));
valor=get(hObject,'Value');
% whos valor

if valor == 1
    set(handles.uipanel12,'Visible','off')
    set(handles.uipanel10,'Visible','on')
    set(handles.pushbutton60,'Visible','on')
else % valor==2
    set(handles.uipanel12,'Visible','on')
    set(handles.uipanel10,'Visible','on')
    set(handles.pushbutton60,'Visible','on')

end

% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as
text

```

```

%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
close all force
GUI
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

V =      str2double(get(handles.edit1,'String'));
contents = cellstr(get(handles.edit2,'String'));
N=      get(handles.edit2,'Value');
G=      0;
C=      str2double(get(handles.edit3,'String'));
S=      str2double(get(handles.edit18,'String'));

cd=     str2double(get(handles.edit19,'String'));
RG=     0 ;

```

```

cl=    str2double(get(handles.edit45, 'String'));

mt=    str2double(get(handles.edit6, 'String'));
mc=    str2double(get(handles.edit7, 'String'));

ap=    get(handles.popupmenu3, 'Value')-2;
y=    str2double(get(handles.edit20, 'String'));
h =    y;

theta=    str2double(get(handles.edit21, 'String'));
mf=    str2double(get(handles.edit8, 'String'));
ms =    str2double(get(handles.edit40, 'String'));
f =    str2double(get(handles.edit9, 'String'));

I1=str2double(get(handles.edit24, 'String'));
I2=str2double(get(handles.edit27, 'String'));
I3=str2double(get(handles.edit30, 'String'));
I4=str2double(get(handles.edit33, 'String'));
I5=str2double(get(handles.edit36, 'String'));
I6=str2double(get(handles.edit39, 'String'));

temp(1)=str2double(get(handles.edit22, 'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit25, 'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit28, 'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit31, 'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit34, 'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit37, 'String'));

B= temp';

temp(1)=str2double(get(handles.edit23, 'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit26, 'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit29, 'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit32, 'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit35, 'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit38, 'String'));

O= temp';

ME=1;
MA=1;
IN=1;
OP=1;

%    return

```

```

figure(2);
[Pe, Pc,
datP]=NIVEL_v2(V,N,G,C,S,cd,RG,cl,mt,mc,ap,y,h,theta,mf,I1,I2
,I3,I4,I5,I6,B,O,ME,MA,IN,OP,ms,f);

if Pe ==-10
    set(handles.edit10,'String','No calculable')
else
    set(handles.edit10,'String',Pe)
end
% if Pc ==-10
%     set(handles.edit11,'String','No hay Efecto Corona')
% else
%     set(handles.edit11,'String',Pc)
% end
% set(handles.edit12,'String',datP.P)

% E
% CF

% hObject    handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit10 as
text
%     str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit10 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit10 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% % %

V =      str2double(get(handles.edit1,'String'));
contents = cellstr(get(handles.edit2,'String'));
N=      get(handles.edit2,'Value');
G=      0;
C=      str2double(get(handles.edit3,'String'));
S=      str2double(get(handles.edit18,'String'));

cd=      str2double(get(handles.edit19,'String'));
RG=      0 ;
cl=      str2double(get(handles.edit45,'String'));

mt=      str2double(get(handles.edit6,'String'));
mc=      str2double(get(handles.edit7,'String'));

ap=      get(handles.popupmenu3,'Value')-2;
y=      str2double(get(handles.edit20,'String'));
h =      y;

theta=      str2double(get(handles.edit21,'String'));
mf=      str2double(get(handles.edit8,'String'));
ms =      str2double(get(handles.edit40,'String'));
f =      str2double(get(handles.edit9,'String'));

I1=str2double(get(handles.edit24,'String'));
I2=str2double(get(handles.edit27,'String'));
I3=str2double(get(handles.edit30,'String'));
I4=str2double(get(handles.edit33,'String'));

```

```

I5=str2double(get(handles.edit36,'String'));
I6=str2double(get(handles.edit39,'String'));

temp(1)=str2double(get(handles.edit22,'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit25,'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit28,'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit31,'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit34,'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit37,'String'));

B= temp';

temp(1)=str2double(get(handles.edit23,'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit26,'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit29,'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit32,'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit35,'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit38,'String'));

O= temp';

ME=1;
MA=1;
IN=1;
OP=1;

% return
figure(2);
[Pe, Pc,
datP]=NIVEL_v2(V,N,G,C,S,cd,RG,cl,mt,mc,ap,y,h,theta,mf,I1,I2
,I3,I4,I5,I6,B,O,ME,MA,IN,OP,ms,f);

% if Pe ==-10
% set(handles.edit10,'String','No calculable')
% else
% set(handles.edit10,'String',Pe)
% end
if Pc ==-10
set(handles.edit11,'String','No hay Efecto Corona')
else
set(handles.edit11,'String',Pc)
end
% set(handles.edit12,'String',datP.P)

```

```

% hObject      handle to pushbutton4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit11 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

V =      str2double(get(handles.edit1,'String'));
contents = cellstr(get(handles.edit2,'String'));
N=      get(handles.edit2,'Value');

```

```

G=      0;
C=      str2double(get(handles.edit3, 'String'));
S=      str2double(get(handles.edit18, 'String'));

cd=     str2double(get(handles.edit19, 'String'));
RG=     0 ;
cl=     str2double(get(handles.edit45, 'String'));
mt=     str2double(get(handles.edit6, 'String'));
mc=     str2double(get(handles.edit7, 'String'));

ap=     get(handles.popupmenu3, 'Value')-2;
y=      str2double(get(handles.edit20, 'String'));
h =     y;

theta=   str2double(get(handles.edit21, 'String'));
mf=     str2double(get(handles.edit8, 'String'));
ms =    str2double(get(handles.edit40, 'String'));
f  =    str2double(get(handles.edit9, 'String'));

I1=str2double(get(handles.edit24, 'String'));
I2=str2double(get(handles.edit27, 'String'));
I3=str2double(get(handles.edit30, 'String'));
I4=str2double(get(handles.edit33, 'String'));
I5=str2double(get(handles.edit36, 'String'));
I6=str2double(get(handles.edit39, 'String'));

temp(1)=str2double(get(handles.edit22, 'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit25, 'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit28, 'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit31, 'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit34, 'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit37, 'String'));

B= temp';

temp(1)=str2double(get(handles.edit23, 'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit26, 'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit29, 'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit32, 'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit35, 'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit38, 'String'));

O= temp';

ME=1;

```

```

    MA=1;
    IN=1;
    OP=1;

%     return
figure(2);
[Pe, Pc,
datP]=NIVEL_v2(V,N,G,C,S,cd,RG,cl,mt,mc,ap,y,h,theta,mf,I1,I2
,I3,I4,I5,I6,B,O,ME,MA,IN,OP,ms,f);

% if Pe ==-10
%     set(handles.edit10,'String','No calculable')
% else
%     set(handles.edit10,'String',Pe)
% end
if datP.P ==-10
    set(handles.edit12,'String','No hay Efecto Corona')
else
    set(handles.edit12,'String',datP.P)
end
% datP.E

% hObject     handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as
text
%     str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit12 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton6.
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit13 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit13 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton7.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

V = str2double(get(handles.edit1,'String'));
contents = cellstr(get(handles.edit2,'String'));
N= get(handles.edit2,'Value');
G= 0;
C= str2double(get(handles.edit3,'String'));
S= str2double(get(handles.edit18,'String'));

cd= str2double(get(handles.edit19,'String'));
RG= 0 ;
cl= str2double(get(handles.edit3,'String'));

mt= str2double(get(handles.edit6,'String'));
mc= str2double(get(handles.edit7,'String'));

ap= get(handles.popupmenu3,'Value')-2;
y= str2double(get(handles.edit20,'String'));
h = y;

theta= str2double(get(handles.edit21,'String'));
mf= str2double(get(handles.edit8,'String'));
ms = str2double(get(handles.edit40,'String'));
f = str2double(get(handles.edit9,'String'));

I1=str2double(get(handles.edit24,'String'));
I2=str2double(get(handles.edit27,'String'));
I3=str2double(get(handles.edit30,'String'));
I4=str2double(get(handles.edit33,'String'));

```

```

I5=str2double(get(handles.edit36,'String'));
I6=str2double(get(handles.edit39,'String'));

temp(1)=str2double(get(handles.edit22,'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit25,'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit28,'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit31,'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit34,'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit37,'String'));

B= temp';

temp(1)=str2double(get(handles.edit23,'String'));
temp(2)=str2double(get(handles.edit26,'String'));
temp(3)=str2double(get(handles.edit29,'String'));
temp(4)=str2double(get(handles.edit32,'String'));
temp(5)=str2double(get(handles.edit35,'String'));
temp(6)=str2double(get(handles.edit38,'String'));

O= temp';

ME=1;
MA=1;
IN=1;
OP=1;

% return
figure(2);
[Pe, Pc,
datP]=NIVEL_v2(V,N,G,C,S,cd,RG,cl,mt,mc,ap,y,h,theta,mf,I1,I2
,I3,I4,I5,I6,B,O,ME,MA,IN,OP,ms,f);

set(handles.edit14,'String',datP.CF)

% if Pe ==-10
% set(handles.edit10,'String','No calculable')
% else
% set(handles.edit10,'String',Pe)
% end
% if datP.P ==-10
% set(handles.edit12,'String','No hay Efecto Corona')
% else
% set(handles.edit12,'String',datP.P)
% end
% datP.E

```

```

% hObject    handle to pushbutton7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit14 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit14 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton8.
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit15 as
text
%             str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit15 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%             See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
load Campo
    set(handles.edit43,'String',E)
% hObject      handle to pushbutton9 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton10.
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
nombre=get(handles.edit44,'String');
set(gcf,'PaperPositionMode','auto');
print('-djpeg ','-r700' ,nombre)

% hObject    handle to pushbutton10 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
close all force;

% --- Executes on button press in checkbox1.
function checkbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to checkbox1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of check-
box1

% --- Executes on button press in pushbutton12.
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton12 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton15.
function pushbutton15_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton15 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton16.
function pushbutton16_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton16 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton17.
function pushbutton17_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton17 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton18.
function pushbutton18_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton18 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton19.
function pushbutton19_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton19 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton20.
function pushbutton20_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton20 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton21.
function pushbutton21_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton21 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton22.
function pushbutton22_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton22 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton23.
function pushbutton23_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton23 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton24.
function pushbutton24_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton24 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton25.
function pushbutton25_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton25 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton26.
function pushbutton26_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton26 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton27.
function pushbutton27_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton27 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton28.
function pushbutton28_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton28 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton29.
function pushbutton29_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton29 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton30.
function pushbutton30_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton30 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton31.
function pushbutton31_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton31 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton32.
function pushbutton32_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton32 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton33.
function pushbutton33_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton33 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton34.
function pushbutton34_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton34 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton35.
function pushbutton35_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton35 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton36.
function pushbutton36_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton36 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton37.
function pushbutton37_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton37 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton38.
function pushbutton38_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton38 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton39.
function pushbutton39_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton39 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton40.
function pushbutton40_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton40 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on selection change in popupmenu2.
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns
popupmenu2 contents as cell array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu2

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton41.
function pushbutton41_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('Factor ambiental.JPG');
% hObject handle to pushbutton41 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton42.
function pushbutton42_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton42 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton43.
function pushbutton43_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton43 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton44.
function pushbutton44_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton44 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit18_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit18 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit18 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit18 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit18_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit18 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit17_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit17 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit17 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit17 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit17_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit17 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

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

```

```

function edit19_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit19 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit19 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit19 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit19_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit19 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.

```

```

%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit21_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit21 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit21 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit21 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit21_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit21 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit20_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit20 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit20 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit20 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit20_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit20 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu3.
function popupmenu3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)
% contents = cellstr(get(hObject,'String'))

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns
popupmenu3 contents as cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu3

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on
Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit22_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit22 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit22 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit22 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit22_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit22 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit23_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit23 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit23 as
text

```

```

%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit23 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit23_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit23 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit24_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit24 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit24 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit24 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit24_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit24 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit25_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit25 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit25 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit25 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit25_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit25 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit26_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit26 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit26 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit26 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit26_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit26 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit27_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit27 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit27 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit27 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit27_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit27 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit28_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit28 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit28 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit28 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit28_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit28 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

```
end
```

```
function edit29_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit29 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit29 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit29 as a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
```

```
function edit29_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit29 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
```

```
%         See ISPC and COMPUTER.
```

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

```
end
```

```
function edit30_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit30 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)
```

```
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit30 as
text
```

```

%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit30 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit30_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit30 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit31_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit31 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit31 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit31 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit31_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit31 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit32_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit32 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit32 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit32 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit32_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit32 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit33_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit33 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit33 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit33 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit33_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit33 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit34_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit34 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit34 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit34 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit34_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit34 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit35_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit35 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit35 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit35 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit35_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit35 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

```
end
```

```
function edit36_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit36 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit36 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit36 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit36_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit36 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit37_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit37 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit37 as
text
```

```

%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit37 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit37_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit37 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit38_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit38 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit38 as
text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit38 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit38_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit38 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit39_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit39 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit39 as
text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit39 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.

```

```

function edit39_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit39 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.

```

```

%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton45.

```

```

function pushbutton45_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('Factor superficial.JPG');
% hObject    handle to pushbutton45 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton46.
function pushbutton46_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('Factor de forma del conductor.JPG');
% hObject handle to pushbutton46 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton47.
function pushbutton47_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('Estado superficial del conductor.JPG');
% hObject handle to pushbutton47 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

function edit40_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit40 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit40 as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit40 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit40_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit40 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on selection change in popupmenu4.
function popupmenu4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns
popupmenu4 contents as cell array
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu4

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on
Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit41_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit41 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit41 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit41 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit41_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit41 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit42_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit42 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit42 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit42 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit42_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit42 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton48.
function pushbutton48_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton48 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton49.
function pushbutton49_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton49 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton50.
function pushbutton50_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton50 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton51.
function pushbutton51_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton51 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton52.
function pushbutton52_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton52 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton53.
function pushbutton53_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton53 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton54.
function pushbutton54_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton54 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton55.
function pushbutton55_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton55 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton56.
function pushbutton56_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton56 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton57.
function pushbutton57_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton57 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton58.
function pushbutton58_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton58 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton59.
function pushbutton59_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton59 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton60.
function pushbutton60_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton60 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton61.
function pushbutton61_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton61 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton62.
function pushbutton62_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton62 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton63.
function pushbutton63_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton63 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton64.
function pushbutton64_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton64 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton65.
function pushbutton65_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton65 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton66.
function pushbutton66_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton66 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton67.
function pushbutton67_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton67 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton68.
function pushbutton68_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton68 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton69.
function pushbutton69_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton69 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on button press in pushbutton70.
function pushbutton70_Callback(hObject, eventdata, handles)
winopen('Tabla.png');
% hObject      handle to pushbutton70 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% --- Executes on selection change in popupmenu5.
function popupmenu5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to popupmenu5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns
popupmenu5 contents as cell array
%             contents{get(hObject,'Value')} returns selected item
from popupmenu5

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function popupmenu5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to popupmenu5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on
Windows.
%             See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit43_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit43 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit43 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit43 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit43_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit43 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit44_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit44 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit44 as
text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit44 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit44_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit44 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit45_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit45 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit45 as
text
%           str2double(get(hObject,'String')) returns contents
of edit45 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit45_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit45 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all Cre-
ateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Win-
dows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton71.

```

```
function pushbutton71_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton71 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA-
TA)
```

```
% --- Executes on button press in pushbutton72.
```

```
function pushbutton72_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton72 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDA
```

# **PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN ALTA TENSIÓN. COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS EPRI, PEEK Y PETERSON**

## **CORONA LOSSES IN TRANSMISSION LINES IN HIGH VOLTAGE. COMPARISON OF METHODS EPRI, PEEK AND PETERSON**

**EDGAR FABIÁN MANTILLA TINOCO**  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
[UISTINO@GMAIL.COM](mailto:UISTINO@GMAIL.COM)  
BUCARAMANGA, COLOMBIA

**LUIS MAURICIO CALA ARIAS**  
ESTUDIANTE DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
[CALA.A82@HOTMAIL.COM](mailto:CALA.A82@HOTMAIL.COM)  
BUCARAMANGA, COLOMBIA

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se presenta un análisis comparativo para el cálculo de pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión a través de los métodos de peek, de peterson y del epri. dichos métodos son aplicados a tres casos reales de líneas de transmisión de diferente topología, a tensiones de 115, 230 y 500 kv, tanto para buen clima como para mal clima, presentando adicionalmente las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos.

**PALABRAS CLAVE:** Efecto corona, EPRI, Peterson, Peek, líneas de transmisión, pérdidas por corona, alta tensión.

### **ABSTRACT**

Work in this occurs a comparative analysis for the calculation of losses in line corona high voltage transmission through methods peek, and peterson epri. these methods are applied to three true stories of transmission lines of different topology, a voltage 115, 230 and 500 kv, both as good weather for bad weather, in addition making the advantages and disadvantages of each of the methods.

**KEYWORDS:** Effect crown, EPRI, Peterson, Peek, transmission lines, corona losses, high voltage.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las bases de la energía eléctrica se forjaron a partir de 1831, año en el que el científico inglés Michael Faraday descubrió el fenómeno de la inducción electromagnética. Descubrimiento que posteriormente dio origen a profundas investigaciones sobre la interacción de conductores de corriente eléctrica con el campo electromagnético, posibilitando así la creación de generadores eléctricos, originando el principio de todo Sistema Eléctrico de Potencia (SEP).

En la actualidad, un Sistema Eléctrico de Potencia está conformado básicamente por un conjunto de centrales generadoras, de líneas de transmisión interconectadas entre sí, y de sistemas de distribución.

## 2. MARCO TEÓRICO

Debido a la importancia que tienen las líneas de transmisión en la industria eléctrica, existen varios factores a considerar en su diseño y planeación antes de que éstas sean puestas en servicio. Uno de los fenómenos más frecuentes en las líneas de alta tensión es el llamado efecto corona, el cual es producto de la acumulación de cargas en las regiones de un conductor cargado, generando un campo eléctrico muy intenso, capaz de ocasionar la ruptura dieléctrica del aire en las inmediaciones de las regiones.

La corona se debe principalmente a la ionización del aire, proceso mediante el cual se originan iones productos de la colisión de los iones que son atraídos y repelidos por el conductor a grandes velocidades. Esto ocasiona que el aire se comporte como un conductor, aumentando el diámetro eficaz del conductor metálico.

Al presentarse el efecto corona y producirse la ionización del aire, se producen fenómenos como la luminosidad en torno al conductor, el ruido audible, las perturbaciones, la generación de ozono y el viento iónico entre otros, cada uno en mayor o menor proporción según las condiciones generales. Para que se pueda presentar cada uno de estos fenómenos, se requiere de una cantidad mínima de energía, la cual proviene de una misma fuente, y es de la energía transmitida a través de los conductores de las líneas. Bajo condiciones de tensiones mínimas, de diámetros y espaciamientos de conductores, y de condiciones meteorológicas o atmosféricas, ésta energía puede llegar a alcanzar valores tan grandes como para ser considerados en los diseños y operaciones de las líneas. Dichas pérdidas pueden ser controladas y mitigadas realizando un buen diseño, basado en análisis y cálculos adecuados. Actualmente diferentes métodos y programas permiten calcular y simular una línea de

transmisión, para así conocer y mitigar las pérdidas por corona.

### 2.1 Método de Peek

El ingeniero norte americano F.W. Peek empezó a realizar investigaciones sobre el fenómeno corona desde 1912 cuando trabajaba en General Electric. Ya en el año 1929, Peek desarrolló un método basado en una fórmula empírica para poder calcular las pérdidas de corona en las líneas de transmisión.

Las pérdidas corona Peek ( $P_p$ ), en kW/km por fase se estiman a través de la fórmula:

$$P_p = \frac{241 \times 10^{-5}}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{\text{RMG}}{\text{DMG}} \left[ \ln \frac{\text{DMG}}{\text{RMG}} \right]^2 \text{RMG}^2 (E - E_c)^2} \quad (1)$$

Dónde:

f = Frecuencia [Hz].

DMG: Distancia media geométrica [cm].

RMG: Radio medio geométrico [cm].

$\delta$ : Factor de corrección de la densidad del aire.

$$\delta = \frac{3,855 + h}{273 + \theta} \quad (2)$$

$\theta$ : es la temperatura [°C].

h: es la presión del aire [cm de Hg].

E: Gradiente de tensión superficial [kVrms/cm].

$$E = \frac{V_{\text{fase-tierra}}}{R \cdot \ln \left( \frac{\text{DMG}}{\text{RMG}} \right)} \quad (3)$$

$V_{\text{fase-tierra}}$ : Nivel de tensión en el conductor entre conductor y tierra [kV].

R: Radio del conductor [cm].

$E_c$ : Gradiente crítico de Peek [kVrms/cm].

$$E_c = E_o * \delta * m_t * m_c * \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta R}} \right) \quad (4)$$

$E_o$ : Gradiente crítico disruptivo del aire:

29,8 [kV/cm] (Valor máximo)

21,1 [kV/cm] (Valor efectivo)

$m_t$ : Coeficiente meteorológico:

1 si es Seco

0,8 si es Húmedo

0,16 – 0,25 si es Lluvia

$m_c$ : Coeficiente de rugosidad:  
 1 si es liso e ideal  
 0,88 – 0,96 nuevo y limpio  
 0,8 – 0,87 áspero envejecido  
 0,5 – 0,7 tratado deficientemente

## 2.2 Método de Peterson

En el año 1933, el científico S. Peterson, reconocido investigador de la época, publica un método mediante el cual se logran estimar las pérdidas por efecto corona para líneas de transmisión bajo ciertas condiciones.

Las pérdidas corona Peterson ( $P_c$ ), en kW/km por fase se estiman a través de la fórmula:

$$P_c = \frac{111,13 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot V_f^2 \cdot \phi}{[\ln(\frac{DMG}{R})]^2} \quad (5)$$

Dónde:

$f$ : Frecuencia del sistema [Hz].  
 $V_f$ : Tensión eficaz entre fase y neutro [kV<sub>rms</sub>].  
 $DMG$ : Distancia media geométrica [cm]  
 $R$ : Radio del conductor [cm]  
 $\phi$ : Factor de forma que depende de la relación  $V_f/V_0$ .

Para estimar el valor de  $\phi$ , primero se deben conocer los valores de la tensión eficaz y de la tensión crítica, una vez conocidos, se calcula su relación, la cual se emplea para estimar el valor de forma de la tabla 1, o las figuras 1 y 2.

$V_0$ : Tensión crítica de corona [kV<sub>rms</sub>].

Para líneas de transmisión que dispongan de un solo conductor por circuito:

$$V_0 = g_0 \cdot R \cdot \ln(\frac{DMG}{R}) \quad (6)$$

Para líneas de transmisión que dispongan de dos o más conductores por circuito:

$$V_0 = g_0 \left[ 1 + \frac{(n-1) \cdot R}{r_g} \right] \cdot n \cdot R \cdot \ln \left[ \frac{2 \cdot h_{mc} \cdot DMG}{RMG \sqrt{4h_{mc}^2 + DMG^2}} \right] \quad (7)$$

$$g_0 = 30 \cdot m_s \cdot m_f \cdot (1 - 0,07R) \delta^{2/3} \quad (8)$$

$$h_{mc} = h_{CT} - \frac{2}{3} f_l \quad (9)$$

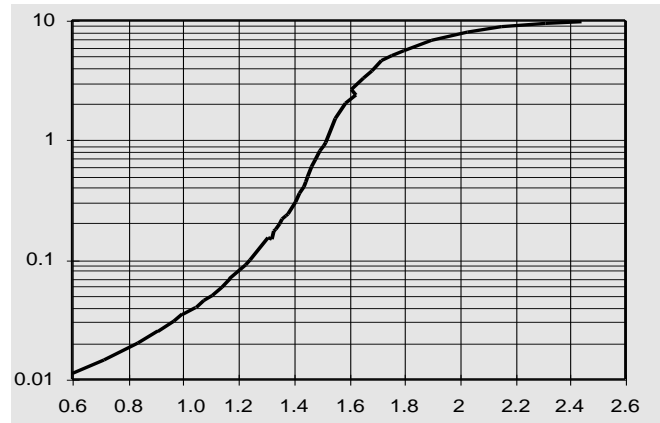
$$r_g = \frac{B}{2 \cdot \text{sen}(\frac{\pi}{n})} \quad (10)$$

$g_0$ : Gradiente de potencial.  
 $n$ : Número de conductores por fase.  
 $r_g$ : Radio geométrico del haz [cm].  
 $h_{CT}$ : Altura del conductor en la torre [m].  
 $f_l$ : Flecha [m].  
 $RMG$ : Radio medio geométrico [cm].

$m_s$ : Factor de corrección por el estado de la superficie del conductor:  
 1 limpia o lisa  
 0,9 envejecida  
 0,8 nueva  
 0,7 sucia o engrasada  
 0,3 – 0,5 húmeda

$m_f$ : Factor de forma del conductor:  
 1 perfectamente circular  
 0,9 de 12 a 30 hilos en su capa externa  
 0,85 con 6 hilos en su capa externa

$\delta$ : Densidad relativa del aire (ecu. 2).  
 $B$ : Separación entre dos conductores consecutivos en el haz de una fase.



**Figura1.** Función empírica de Peterson para estimar el coeficiente  $\phi$  de 0,6 a 2,6.



**Figura 2.** Función empírica de Peterson para estimar el coeficiente  $\phi$  de 1 a 21.

**Tabla 1.** Valores de función empírica de Peterson para calcular la pérdida corona

$V_f/V_0$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$\phi$	0,011	0,014	0,018	0,025	0,036	0,053	0,085

### 2.3 Método del EPRI

Desde sus inicios en 1972, el Electric Power Research Institute (EPRI) se ha dedicado al estudio e investigación sobre todo lo relacionado a la industria eléctrica.

Entre tantas investigaciones, el EPRI logró recopilar un método empírico basado en mediciones de pérdidas por efecto corona en jaulas de ensayo donde se usa una configuración coaxial equivalente a una línea de transmisión. Dicha metodología se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\text{Línea}} = kP_e \quad (11)$$

Dónde:

$P_{\text{Línea}}$ : Pérdidas por fase de una línea.

$P_e$ : Pérdidas reducidas de la jaula de ensayo.

$k$ : Factor electrogeométrico

El factor electrogeométrico se evalúa empleando la ecuación 12.

$$k = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{r_{eq}}\right)}{\ln\left(\frac{R_1}{\rho}\right)} \quad (12)$$

En donde:

$r_{eq}$ : Radio equivalente del haz (radio de un conductor sencillo con igual capacitancia) [cm].

$R_1$ : Radio de la jaula equivalente (radio de un coaxial ficticio que tenga la misma capacitancia por fase de la línea analizada) [cm].

$\rho$ : Radio corona (distancia promedio equivalente entre la carga espacial producida por el efecto corona y el centro del haz) [cm]; que se puede estimar mediante la ecuación 13.

$$\rho = \sqrt{\frac{16200}{f}nr + \left(\frac{B}{2}\right)^2} \quad (13)$$

$B$ : Separación entre subconductores consecutivos de un haz. [cm].

$n$ : Número de subconductores del haz.

$r$ : Radio del subconductor [cm].

$f$ : Frecuencia [Hz].

Dependiendo de la cantidad y tipo de conductor en la línea de transmisión, el valor de las pérdidas reducidas ( $P_e$ ) será diferente [3]. Para el presente trabajo, de las ecuaciones desarrolladas se tomaron las ecuaciones 14, 15, 16 y 17. Las ecuaciones 14 y 15 se emplean para un conductor por fase, cuyo radio es igual 1,09 [cm] (Darien) en ambiente seco y de lluvia, respectivamente; mientras que las ecuaciones 16 y 17 se emplean para cuatro (4) conductores por fase, cuyo radio es igual a 1,26 [cm] (Flint) con una distancia entre subconductores de 45,72 [cm], en ambiente seco y de lluvia, respectivamente.

$$0,084(E - 11,48)^2 - 0,5 \quad (14)$$

$$0,09474(E - 10,27)^2 + 0,3472 \quad (15)$$

$$0,3471(E - 11,73)^2 - 0,228 \quad (16)$$

$$0,2919(E - 6,96)^2 + 0,3894 \quad (17)$$

Para las ecuaciones anteriores, el campo eléctrico ( $E$ ) es estimado por medio del teorema de Gauss:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\rho} \quad (18)$$

Dónde:

$\rho$ : Distancia desde el conductor hasta el punto en el cual se desea calcular el campo eléctrico.

[Q]: [C][V]: Vector de cargas  
 $\epsilon_0: 8,854 \times 10^{-12}$  [F/m]

La estimación del campo eléctrico se realiza empleando el programa E\_corona [8].

### 3. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS

Se tomaron como casos de estudio tres (3) líneas de transmisión reales del STN (sistema de transmisión nacional), a las cuales se les estimó las pérdidas por efecto corona mediante la aplicación de los métodos Peek, Peterson y EPRI.

#### 3.1 Línea de transmisión 1.

La primera configuración de línea de transmisión es la de “Fundación – Río Córdoba (ISA, 1979)”, la cual tiene las siguientes especificaciones:

Tensión de operación: 115 kV  
 Capacidad de la línea: 126 MVA  
 Número de conductores por fase: 1  
 Distancia entre fases: 4,5 m  
 Altura de la fase a la tierra: 15 m  
 Radio del conductor: 1,09 cm (Conductor Darién)  
 Número de cables de guarda: 2  
 Longitud de la línea: 68,5 km  
 Configuración de la línea: Circuito sencillo horizontal  
 Temperatura media: 28°C  
 Altura media sobre nivel del mar: 45 msnm

En las tablas 2, 3 y 4, se presenta el resumen de la estimación de efecto corona para la línea de 115 kV mediante los métodos Peek, Peterson y EPRI, respectivamente.

**Tabla 2.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método Peek.

Presión barométrica (h)	75,572 cm de Hg
Factor de corrección de la densidad del aire ( $\delta$ )	0,968
Factor ambiental ( $m_t$ )	0,2
Factor superficial del conductor ( $m_c$ )	0,85
Gradiente crítico de Peek ( $E_c$ )	6,341 kV/cm
DMG	5,67 m
RMG	1,09 cm
Gradiente de tensión superficial (E)	9,74 kV/cm
Pérdidas por efecto corona	0,7965 kW/km-fase

**Tabla 3.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método Peterson.

Factor de forma del conductor ( $m_f$ )	0,9
Factor de corrección por el estado de la superficie del conductor ( $m_s$ )	0,9
Gradiente de potencial ( $g_o$ )	21,964 kV/cm
Tensión crítica de corona ( $V_o$ )	149,730 kV
$V_f/V_o$	0,443
$\varphi$	--
Pérdidas por efecto corona	No hay pérdidas

**Tabla 4.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 115 kV por el método EPRI.

Radio corona ( $\rho$ )	17,155 cm
Capacitancia por fase ( $C_\phi$ )	$8,9745 \times 10^{-12}$ F/fase
Campo eléctrico promedio (E)	9,8523 kV/cm
Radio de la jaula equivalente ( $R_1$ )	536,53 cm
Factor electrogeométrico (k)	1,8
Pérdidas por efecto corona	0,655 kW/km-fase

#### 3.2 Línea de transmisión 2.

La segunda configuración de línea de transmisión es la de “Copey – Fundación (ISA, 1979)”, la cual tiene las siguientes especificaciones:

Tensión de operación: 230 kV  
 Capacidad de la línea: 278 MVA  
 Número de conductores por fase: 1  
 Distancia entre fases: 8 m  
 Altura de la fase a la tierra: 20 m  
 Radio del conductor: 1,09 cm (Conductor Darién)  
 Número de cables de guarda: 2  
 Longitud de la línea: 60 km  
 Configuración de la línea: Circuito sencillo horizontal  
 Temperatura media: 28°C  
 Altura media sobre nivel del mar: 108 msnm

En las tablas 5, 6 y 7, se presenta el resumen de la estimación de efecto corona para la línea de 230 kV mediante los métodos Peek, Peterson y EPRI, respectivamente.

**Tabla 5.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método Peek.

Presión barométrica (h)	74,98 cm de Hg
Factor de corrección de la densidad del aire ( $\delta$ )	0,960
Factor ambiental ( $m_t$ )	0,2

Factor superficial del conductor ( $m_c$ )	0,85
Gradiente crítico de Peek ( $E_c$ )	6,294 kV/cm
DMG	10,08 m
RMG	1,09 cm
Gradiente de tensión superficial (E)	17,84 kV/cm
Pérdidas por efecto corona	7,590 kW/km-fase

**Tabla 6.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método Peterson.

Factor de forma del conductor ( $m_f$ )	0,9
Factor de corrección por el estado de la superficie del conductor ( $m_s$ )	0,9
Gradiente de potencial ( $g_o$ )	21,843 kV/cm
Tensión crítica de corona ( $V_o$ )	162,604 kV
$V_f/V_o$	0,817
$\varphi$	0,01919
Pérdidas por efecto corona	0,048 kW/km-fase

**Tabla 7.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 230 kV por el método EPRI.

Radio corona ( $\rho$ )	17,155 cm
Capacitancia por fase ( $C_\varphi$ )	$8,225 \times 10^{-12}$ F/fase
Campo eléctrico promedio (E)	18,05 kV/cm
Radio de la jaula equivalente ( $R_1$ )	943,9 cm
Factor electrogeométrico ( $k$ )	1,688
Pérdidas por efecto corona	10,266 kW/km-fase

### 3.3 Línea de transmisión 3.

La tercera configuración de una línea de transmisión es la de Chinú – Sabanalarga (SMA, 1986), la cual tiene las siguientes especificaciones:

Tensión de operación: 500 kV  
 Capacidad de la línea: 1985 MVA  
 Número de conductores por fase: 4  
 Distancia entre fases: 10,5 m  
 Altura de la fase a la tierra: 23 m  
 Distancia entre subconductores: 45,72 cm  
 Radio del conductor: 1,26 cm (Conductor Flint)  
 Número de cables de guarda: 2  
 Longitud de la línea: 186 km  
 Configuración de la línea: Circuito sencillo horizontal  
 Temperatura media: 30°C  
 Altura media sobre nivel del mar: 103 msnm

Flecha promedio: 17 m  
 Altura del conductor en la torre: 23 m

En las tablas 8, 9 y 10, se presenta el resumen de la estimación de efecto corona para la línea de 500 kV mediante los métodos Peek, Peterson y EPRI, respectivamente.

**Tabla 8.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método Peek.

Presión barométrica (h)	75,02 cm de Hg
Factor de corrección de la densidad del aire ( $\delta$ )	0,954
Factor ambiental ( $m_t$ )	0,2
Factor superficial del conductor ( $m_c$ )	0,85
Gradiente crítico de Peek ( $E_c$ )	6,160 kV/cm
DMG	13,23 m
RMG	32,33 cm
$r_{eq}$	20,25 cm
Gradiente de tensión superficial (E)	54,82 kV/cm *

\* A condiciones normales de operación (teóricamente hablando, 20°C y 760 mm de Hg), el campo eléctrico generado no debe superar los 30 kV/cm dado que si esto sucede se presenta ruptura, por tal motivo no es coherente estimar pérdidas por efecto corona, porque el gradiente crítico de Peek eficaz debería superar el gradiente de tensión superficial.

**Tabla 9.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método Peterson.

Factor de forma del conductor ( $m_f$ )	0,9
Factor de corrección por el estado de la superficie del conductor ( $m_s$ )	0,9
Gradiente de potencial ( $g_o$ )	21,471 kV/cm
Tensión crítica de corona ( $V_o$ )	417,157 kV
$V_f/V_o$	0,692
$\varphi$	0,0137
Pérdidas por efecto corona	0,152 kW/km-fase

**Tabla 10.** Resumen de los cálculos para estimar efecto corona en la línea de 500 kV por el método EPRI.

Radio corona ( $\rho$ )	43,4 cm
Capacitancia por fase ( $C_\varphi$ )	$1,3632 \times 10^{-11}$ F/fase

Campo eléctrico promedio ( $E$ )	15,75 kV/cm
Radio de la jaula equivalente ( $R_1$ )	74,6 cm
Factor electrogeométrico ( $k$ )	2,4
Pérdidas por efecto corona	55,063 kW/km-fase

#### 4. ANALÍISIS DE RESULTADOS

Se realizará un análisis de los resultados obtenidos por cada método para cada condición climática, tanto ambiente de lluvia como ambiente seco. Posteriormente se analizará cada metodología según sus características y parámetros matemáticos.

##### 4.1 Resultado por ambiente climático

La metodología de Peterson no contempla entre sus expresiones el entorno climático, por ello los resultados se mantendrán iguales tanto para ambiente de lluvia como para buen clima. En la metodología de Peek el entorno climático influye matemáticamente de forma directa a través del coeficiente meteorológico o factor ambiental  $m_t$ , siendo 1 para condiciones de buen clima y 0,2 para condiciones de lluvia. De igual manera en la metodología del EPRI la condición de buen clima o de mal clima se contemplan en la variación directa y completa de su expresión matemática.

Para los tres (3) casos estudiados, las pérdidas por efecto corona calculadas tanto para buen clima (seco) como para mal clima (lluvia), fueron las siguientes:

**Tabla 11.** Pérdidas por efecto corona mediante cada método en cada una de las líneas.

Caso de estudio	Método empleado	Pérdidas por efecto corona en un ambiente de lluvia [kW/km]	Pérdidas por efecto corona en un ambiente de buen clima [kW/km]
Línea 1 115 [kV]	EPRI	0,655	No corona
	Peek	0,796	No corona
	Peterson	No corona	No corona
Línea 2 230 [kV]	EPRI	10,266	5,282
	Peek	7,591	No corona
	Peterson	0,048	0,048
Línea 3	EPRI	55,063	14,031

500 [kV]	Peek	-----	-----
	Peterson	0,152	0,152

Para el caso de estudio de la línea 1, a una tensión de 115 kV el resultado obtenido para un ambiente de lluvia por el método Peterson es distinto a los otros dos, Peek y EPRI; esto se debe a que en su metodología, cuando el factor  $\phi$  está por debajo del rango del estudio planteado por Peterson, (la relación de  $V_f/V_0$  es menor a 0,6) implica que no hay pérdidas. En cuanto a las metodologías de EPRI y Peek, éstas consideran dos ambientes, el ambiente de buen clima y el de lluvia. Para el presente estudio se asume el caso más crítico y este es el de clima lluvioso, motivo por el cual se consideran como metodologías más acertadas ya que tienen en cuenta un factor importante al momento de diseñar una línea de transmisión de alta tensión y es la condición atmosférica, contemplan el ambiente de un buen clima, un clima húmedo o en su defecto y en el peor de los casos, un clima con lluvia ya que las partículas o gotas de agua que quedan en los conductores empiezan a formar corona.

Ya para un ambiente de buen clima o clima seco, sobresale el valor negativo de las pérdidas por el método EPRI, esto se debe a que el campo eléctrico generado en el circuito es pequeño ya que el espaciado entre fases, el diámetro del conductor y las condiciones atmosféricas favorecen el sistema de transmisión logrando así unas mínimas pérdidas, en conclusión, obtener un valor negativo implica que dichas condiciones están bien diseñadas logrando así que por esta metodología no se estimen pérdidas por efecto corona. En el caso de Peterson y Peek al suponer buen clima se evidencia que no se generan pérdidas por efecto corona.

Para la línea 2, a una tensión de 230 kV el resultado para un ambiente de lluvia fue de valores mayores en relación a los estimados para una tensión de 115 kV, pero con un comportamiento semejante en relación al resultado de cada método. Esto se evidencia en los tres métodos, siendo valores cercanos los estimados mediante EPRI y Peek. El método de Peterson por su parte, a pesar de mostrar un incremento en las pérdidas, sigue siendo un valor bastante inferior al obtenido por los otros dos métodos; esto se debe no sólo a la falta de un factor climático del entorno, sino a los pasos que se deben aplicar para poder estimar un valor mediante dicho método. Si se observa con detenimiento la metodología de Peterson se puede evidenciar un margen de error en cada uno de los pasos, siendo al final un error relevante al realizar el proceso completo.

Al asumir unas condiciones meteorológicas de buen clima (ambiente seco) implica al igual que en cualquier nivel de

tensión una disminución de pérdidas, para el presente estudio, disminución en pérdidas por efecto corona; con la metodología Peek no se generan pérdidas por corona dado a que el gradiente crítico de Peek ( $E_c$ ) eficaz es mayor que el gradiente de tensión superficial ( $E$ ), contrario sucede con EPRI, éste estima unas pérdidas que aunque sean pequeñas son considerables a la hora de realizar un diseño, con la metodología Peterson no se tiene variación dado a que este no diferencia un ambiente de lluvia a un ambiente seco.

Para la línea 3, a una tensión de 500 kV los resultados obtenidos para un clima de lluvia fueron valores muy distantes entre los métodos Peterson y EPRI, siendo el método de Peterson el que menor pérdidas estima. El método del EPRI permite observar un valor más próximo al esperado en líneas de transmisión de alta tensión. La metodología de Peek no estima ningún valor para las pérdidas en dicha tensión, debido a que su gradiente de tensión superficial supera el valor del gradiente crítico de Peek, presentando una descarga. Una vez realizado el estudio para condiciones de buen clima o clima seco, se observó una disminución significativa de pérdidas por efecto corona en la metodología del EPRI, esto se debe al cambio de la expresión matemática empleada para la estimación, según sea el factor climático presente. Para este nivel de tensión se debe precisar que el efecto corona debe ser considerado al momento de realizar el diseño de una línea de transmisión y tener en cuenta el caso crítico ya que las pérdidas en condiciones de lluvia aumentan en más del doble que a condiciones normales (ambiente seco).

#### 4.2 Ventajas y desventajas de los métodos

Cada metodología tiene su propia expresión matemática, conformada por diversos parámetros. En la tabla 12 se presenta de forma general los parámetros requeridos para el uso de los métodos Peek, Peterson y EPRI.

**Tabla 12.** Parámetros requeridos por los métodos Peek, Peterson y EPRI.

Parámetros	EPRI	PETERSON	PEEK
Tensión de la línea [kV]	X	X	X
Número de circuitos	X	X	X
Número de conductores por fase	X	X	X
Separación entre subconductores de una fase [cm]	X	X	X
Radio del conductor [cm]	X	X	X
Estado del clima	X		
Factor ambiental ( $m_a$ )			X
Factor superficial ( $m_c$ )			X

ASNM [m] o Presión barométrica [cm Hg]			X
Temperatura ambiente [°C]		X	X
Factor de forma del conductor ( $m_f$ )		X	
Estado superficial del conductor ( $m_s$ )		X	
Flecha [m]		X	

Resaltando las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos, en base a con ayuda de la tabla 12 se puede concluir:

- Los métodos EPRI y Peek tienen en cuenta las condiciones meteorológicas, ambientales o atmosféricas que rodea la línea de transmisión, en el método EPRI se evidencia al tener diferentes ecuaciones, según sean las condiciones climáticas. Mientras que en Peek se refleja al calcular el gradiente crítico, éste tiene en su fórmula el factor ambiental  $m_t$  que está ligado a las condiciones atmosféricas mencionadas.
- Un factor que aumenta las pérdidas por efecto corona es la condición superficial del conductor, Peterson y Peek tienen en cuenta este fenómeno, mientras que la metodología EPRI no contempla las condiciones del conductor; en Peterson este hecho se ve reflejado en el factor superficial del conductor ( $m_s$ ), el cual tiene unos valores empíricamente establecidos. Peek tiene en cuenta esta condición del conductor en su factor superficial ( $m_c$ ).
- En la puesta en servicio de una línea de transmisión es importante conocer qué tipo de conductor se utilizará, no solamente su radio si no las condiciones de forma, en este aspecto la única metodología que tiene en cuenta dicha característica es la de Peterson, los otros dos métodos tienen en cuenta únicamente el radio del conductor sin precisar su forma, y es evidente que entre más circular sea el conductor, menos contaminación puede acumular y por ende sus pérdidas se reducirán de forma considerable.
- EPRI y Peterson presentan una desventaja considerable en comparación con Peek ya que estas metodologías no tienen en cuenta la altura sobre el nivel del mar de la línea, dicho dato implica humedad relativa en el ambiente, a menor asnm, mayor temperatura y por ende mayor humedad relativa en la zona que rodea el conductor. Se puede

asegurar que la humedad afecta las pérdidas por efecto corona, primero porque una humedad más alta suprime avalanchas de electrones, y segundo porque crea una mayor concentración de vapor de agua en el conductor y esto genera más puntos corona, elevando las pérdidas.

- EPRI tiene en cuenta la condición del ambiente, es lluvia o es buen clima pero algo que omite es la temperatura a la que está sometida la línea de transmisión cosa que no sucede con los métodos de Peterson y de Peek, y como se mencionó anteriormente, a mayor temperatura, mayor humedad y por ende las pérdidas por corona aumentan.
- Una seria desventaja de la metodología Peek es lograr que el gradiente de tensión superficial ( $E$ ) y el gradiente crítico de Peek ( $E_c$ ) sean casi iguales, matemáticamente hablando si se logra dicha igualdad las pérdidas por corona se hacen nulas, sin embargo cuando las líneas se encuentran en operación se obtienen resultados diferentes a los esperados matemáticamente. Esto se puede observar en las investigaciones del Electric Power Research Institute.

## 5. CONCLUSIONES

- Para el diseño de líneas de transmisión, principalmente en alta y extra alta tensión se debe tener presente las pérdidas que se generan por efecto corona, ya que a mayores tensiones dichas pérdidas aumentan de forma considerable; si no se tiene en cuenta este fenómeno la línea se verá afectada en su funcionamiento y su vida útil.
- Si no se tiene en cuenta el efecto corona en la transmisión de energía eléctrica, la potencia al usuario se verá afectada por diversos factores tales como ruido audible, perturbaciones a frecuencias de radio y televisión, generación de ozono, viento iónico y en general pérdidas de energía en mayor o menor cantidad dependiendo de las condiciones que se resume en degradación de la transmisión de potencia.
- Al momento de realizar el diseño de una línea de transmisión, éste se debe realizar en base a las condiciones más desfavorables, tanto climáticas como propias del conductor. Esto se realiza con el fin de poder estimar las pérdidas bajo la peor situación, de esta manera cuando la línea se encuen-

tre en operación, se obtendrán pérdidas menos significativas a las estimadas.

- La pérdidas presentadas por efecto corona dependen de varios factores y parámetros independientes unos de otros, algunos pueden ser corregidos de forma directa por el diseñador y operador de la línea, en base a una buena proyección y selección de los elementos propios de la línea, y de un excelente y periódico mantenimiento de la misma.
- El que un método matemáticamente dependa de más variables y cuente dentro de sus análisis con un mayor número de parámetros externos no asegura mayor precisión en su estimación, pues dependiendo directamente del criterio de selección de cada variable, el rango de error obtenido como resultado final de dicha metodología varía significativamente.
- Se debe tener presente que una línea de transmisión en una zona con temperaturas altas sufre más las pérdidas por efecto corona que una existente en temperaturas bajas dado a que a mayor temperatura, mayor humedad relativa. Este hecho se da porque el vapor de agua actúa como un gas electronegativo que permite capturar electrones para las moléculas de agua logrando así que se supriman avalanchas de electrones y se cree una mayor concentración de vapor de agua en el conductor, generando más puntos irregulares que se pueden convertir en puntos corona, aumentando las pérdidas.
- Para estimaciones sobre pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión cuya tensión de operación sea cercana a los 115 kV, en un ambiente de buen clima se aprecian resultados similares en los tres métodos. Mientras que para ambiente de lluvia y condiciones más desfavorables los métodos que mostraron una mejor estimación fueron EPRRI y Peek, debido a que dentro de su metodología consideran de forma directa el entorno climático a través de factores estipulados.
- Para estimaciones sobre pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión cuya tensión de operación sea cercana a los 230 kV, en un ambiente de buen clima se aprecian valores cercanos y aceptables para las tres metodologías, puesto que a pesar de la discrepancia entre el método Peek estimando la ausencia de pérdidas por corona y los métodos EPRI y Peterson estimando valores de pérdidas por corona, éstos valores son casi insignificantes y

se aproximan a unas pérdidas despreciables. Ya en condiciones climáticas desfavorables, se recomienda emplear la metodología de EPRI y Peek, pues la metodología de Peterson no contempla dichas condiciones en sus planteamientos matemáticos.

- Para estimaciones sobre pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión cuya tensión de operación sea cercana a los 500 kV, tanto para un ambiente de buen clima como de mal clima, se observó gran discrepancia entre los tres métodos aplicados. Porcentualmente el método de Peek estimó valores entorno al 8%, lo cual implican pérdidas considerables por efecto corona para una línea de transmisión, algo que notoriamente un diseñador no aplicaría en su diseño, pues se puede corregir en base a una mejor selección de parámetros.
- No se aconseja emplear la metodología de Peek para estimaciones de pérdidas por efecto corona en operaciones cercanas a los 500 kV, pues sus expresiones matemáticas se plantearon de forma empírica bajo operaciones cercanas e inferiores a los 200 kV.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Project UHV. Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above, Third Edition. Electric Power Research Institute, California. December 2005.
- [2] Rugeles J. J., Chacón V. J. Manual de laboratorio de alta tensión – Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2011
- [3] Rúgeles J.J., Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa). Bucaramanga. Informe final investigación de Colciencias.1995.
- [4] Roman, F., Castillo, G. Metodología para la evaluación de pérdidas corona en líneas de transmisión. Colombia.
- [5] Peek, F.W. Comparison of calculated and measured corona loss curves. New York. February 1915.
- [6] Peek, F. W. The law of corona and the dielectric strength of air. Chicago. June 1911.
- [7] Carroll, J.S, Cozzens, B. Corona loss measurements for the desing of transmission lines to operate at voltages between 220 kV and 330 kV. A.I.E.E.
- [8] Mantilla Edgar, Cala Luis. Pérdidas por efecto corona en líneas de transmisión en alta tensión. Comparación de los métodos EPRI, Peek y Peterson. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2014.