

**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DEL  
APANTALLAMIENTO EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

---

**LINA PAOLA SALAMANCA TORRES  
YEISON JESÚS TORRES ARDILA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2011**

---

**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DEL  
APANTALLAMIENTO EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

---

**LINA PAOLA SALAMANCA TORRES  
YEISON JESÚS TORRES ARDILA**

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Electricista**

Director:

**Dr. HERMANN RAÚL VARGAS TORRES**

Codirector:

**Ms(c). ING. JAIRO GÓMEZ TAPIAS**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2011**

---

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a Dios y a la Virgen María por permitirme alcanzar satisfactoriamente esta etapa de mi vida.*

*Agradezco a mis padres, a mis hermanos por su cariño, comprensión y apoyo incondicional.*

*A Yeison Torres, por su apoyo, compañía durante estos años tan importantes de mi vida.*

*A la Universidad Industrial de Santander y especialmente a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, por todo el conocimiento adquirido para optar al título de Ingeniero Electricista.*

*Al doctor Hermann Raúl Vargas, al Ing. Fernando Gómez Tapias y al Ing. Jairo Gómez Tapias por su paciencia y colaboración prestada para la ejecución de este proyecto.*

*Lina Paola Salamanca Torres*

## AGRADECIMIENTOS

*A mi Padre celestial, por su infinito apoyo, su respaldo, su guianza, su ayuda, su consuelo y su misericordia, a quien dedico todo, ya que sin Él absolutamente nada de esto hubiese sido posible, a Él le debo todo honor, gloria, honra y alabanza por siempre.*

*A mis padres, quienes han sido mi ejemplo a seguir, y cuyo apoyo incondicional y crucial nunca ha faltado en todo momento de mi vida.*

*A mis hermanos Camilo, Maricela y Diana por su apoyo y su ánimo.*

*A Lina por su amor, su paciencia, su apoyo, su compañía y su comprensión durante toda esta etapa de mi vida que he tenido la fortuna de compartir a su lado.*

*Al doctor Hermann Raúl Vargas, al Ing. Fernando Gómez Tapias y al Ing. Jairo Gómez Tapias por su paciencia y colaboración prestada para la ejecución de este proyecto.*

*Yeison Jesús Torres Ardila*

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. GENERALIDADES DE LA FÍSICA DEL RAYO.....	16
2.1. Distribución de cargas eléctricas en nubes de tormenta.....	16
2.2. Características de la descarga atmosférica.....	16
2.3. Clasificación de las descargas eléctricas.....	17
2.4. Parámetros del rayo.....	17
3. MÉTODOS DE APANTALLAMIENTO EN SUBESTACIONES.....	19
4. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE EN MATLAB.....	21
4.1. Diseño.....	21
4.2. Validación.....	23
4.3. Simulación.....	23
4.4. Apantallamiento del área de control de la subestación (Caseta).....	25
5. EJEMPLO DE CÁLCULO Y RESULTADOS.....	26
6. CONCLUSIONES.....	29
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
8. CURRÍCULUMS.....	30

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura tripolar de una nube tormenta. ....	16
Figura 2. Descargas eléctricas atmosféricas. ....	17
Figura 3. Mapa niveles ISO-Niveles cerámicos de Colombia. ....	18
Figura 4. Método de la esfera rodante. ....	20
Figura 5. Probabilidad de la corriente pico de retorno de rayo para diferentes latitudes. ....	24
Figura 6. Función error erf(u). ....	24
Figura 7. Aproximación de la curva de probabilidad de corriente pico de retorno para Colombia. ....	24
Figura 8. Ángulo de protección en función de la altura relativa y el nivel de protección. ....	25
Figura 9. a) Área de la caseta. b) Ángulo de protección de un mástil. ....	26
Figura 10. Ingreso de datos del terreno. ....	27
Figura 11. Ingreso de datos del patio. ....	27
Figura 12. Ingreso de las coordenadas de los apoyos. ....	27
Figura 13. Ventana info. ....	28
Figura 14. Instalación de los cables de guarda. ....	28
Figura 15. Dibujo 3D con los pórticos y los cables de guarda instalados. ....	28
Figura 16. Ventana p1. ....	35
Figura 17. Ventana p2. ....	36
Figura 18. Ventana seleccion. ....	37
Figura 19.a Vista de planta de la ubicación de la subestación en el cuadrante positivo del plano cartesiano ...	38
Figura 19.b Vista de perfil de la ubicación del terracedo del terreno a lo largo del eje y ...	38
Figura 20.a Ventana p3	Figura 20.b Ventana niveles
Figura 21. Ventana advertencia. ....	40
Figura 22. Ventana p4. ....	41
Figura 23. Pórtico de dos apoyos. ....	42
Figura 24. Unión de dos pórticos de dos apoyos. ....	43
Figura 25. Pórtico de tres apoyos. ....	43
Figura 26. Ventana p5. ....	46
Figura 27. Vista de planta de un patio de la subestación. ....	48
Figura 28. Ventana info. ....	49
Figura 29. Vista de planta de dos bahías con pórticos consecutivos. ....	50
Figura 30. Esquema gráfico de la separación recomendada. ....	50
Figura 31. Esquema gráfico de la separación máxima de diseño. ....	51
Figura 32. Ventana p6. ....	52
Figura 33. Ventana advertencia2. ....	53

Figura 34. Ventana p7 .....	54
Figura 35. Ventana aumento .....	56
Figura 36. Ventana decisión.....	57
Figura 37. Ventana reubicar .....	57
Figura 38. Ventana agregar_cables .....	58
Figura 39. Ventana reubicar_cables .....	58
Figura 40. Ventana replantar .....	59
Figura 41. Ventana validación .....	61
Figura 42. Ventana validación2 .....	62
Figura 43. Ventana efectivo .....	62
Figura 44. Ventana p8 .....	63
Figura 45. Ventana caseta .....	64
Figura 46. Dimensiones de la caseta (Vista de planta).....	65
Figura 47. Vista de planta de la caseta de control. ....	66
Figura 48. Vista de planta de la ubicación de los mástiles en el techo de la caseta de control.....	66
Figura 49. Ventana archivos.....	67
Figura 50. Formato de un archivo para el ingreso de los cables de guarda a instalar.....	69
Figura 51. Ventana p1 .....	72
Figura 52. Ventana p2 .....	73
Figura 53. Ventana selección .....	73
Figura 54. Ventana p3 .....	74
Figura 55. Ventana niveles.....	74
Figura 56. Ingreso de datos del patio de 230 kV de la subestación Itaca .....	75
Figura 57. Dibujo 3D .....	76
Figura 58. Ventana info.....	77
Figura 59. Dibujo 3D con cables de guarda incluidos.....	77
Figura 60. Ventana p7 .....	78
Figura 61. Ventana aumento .....	78
Figura 62. Ventana decisión.....	79
Figura 63. Ventana p7 con la opción de simulación habilitada.....	79
Figura 64. Ventana p8 .....	79
Figura 65. Ventana continuar_diseno.....	80
Figura 66. Ventana finalsimulación .....	81
Figura 67. Ventana caseta .....	81
Figura 68. Vista de planta de la caseta de control .....	82
Figura 69. Ventana archivos.....	82

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del rayo.....	17
Tabla 2. Medianas del valor pico de la corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta adaptado de Lee et Al 1979. ....	2
Tabla 3. Valores máximos del radio de la esfera rodante según el nivel de protección. ....	3
Tabla 4. Información básica de entrada de la subestación a validar.....	4
Tabla 5. Coordenadas de los niveles de terraceo del terreno. ....	5
Tabla 6. R Comparación entre las longitudes de los castilletes del sistema y las longitudes calculadas por la herramienta .....	6
Tabla 7. Aplicabilidad de la herramienta software para sistemas de apantallamiento nuevos y existentes.....	6
Tabla 8. Información básica de la subestación.....	6
Tabla 9. Información eléctrica de la subestación .....	6
Tabla 10. Información física del terreno .....	6
Tabla 11. Información de los niveles de terraceo del terreno.....	6
Tabla 12. Información de los pórticos.....	6
Tabla 13. Dimensiones de los patios de la subestación.....	6

## ANEXOS

Manual de usuario .....	33
-------------------------	----

## RESUMEN

**TÍTULO:** ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL DISEÑO DEL APANTALLAMIENTO EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS\*

**AUTORES:** LINA PAOLA SALAMANCA TORRES  
YEISON JESÚS TORRES ARDILA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Apantallamiento, protección contra rayos, modelo electrogeométrico, método de la esfera rodante.

En este proyecto se presenta la fundamentación técnica para el diseño del apantallamiento de subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión contra descargas atmosféricas directas para cualquier tipo de configuración, mediante una herramienta software con interfaz desarrollada en MatLab. El aplicativo permite al usuario abordar un problema típico de la ingeniería eléctrica presente en las subestaciones y plantear opciones técnicas de solución empleando el modelo electrogeométrico (esfera rodante) para los patios de la subestación y el método de ángulos fijos para las áreas de control mediante una metodología que permite ingresar la información necesaria para llevar a cabo su respectivo análisis y entrega al usuario resultados confiables que permiten establecer el número de cables de guarda y la altura de su instalación para el diseño de un apantallamiento efectivo, al igual que las alturas de los mástiles a utilizar en las áreas de control con el objetivo de garantizar y preservar la vida humana y la vida útil de los equipos. Adicional a esto la herramienta cuenta con un módulo de validación y otro de simulación que permiten evaluar la efectividad de un sistema de apantallamiento existente y simular descargas atmosféricas que incidan sobre este y ver su comportamiento.

\* Tesis de grado en la modalidad de investigación

\*\* Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres. Codirector: MSc (c). Jairo Gómez Tapias

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR THE SHIELDING DESIGN IN ELECTRICAL SUBSTATIONS\*

**AUTHORS:** LINA PAOLA SALAMANCA TORRES  
YEISON JESÚS TORRES ARDILA\*\*

**KEYWORDS:** Shielding, lightning protection, electrogeometric model, rolling sphere method.

In this project is presented the technical foundation for the shielding design against direct strokes of high and extra high voltage electrical substations for all kind of configuration through a software tool with interface developed in MatLab. The tool lets the user to tackle a typical problem of the electrical engineering in the substations and to pose technical options of solution using the electrogeometric model (rolling sphere) for the substation's yards and the fixed angles method for the control areas through a methodology that lets to enter the needed information to carry out the respective analysis and to deliver to the user reliable results that lets to set up the number of shield wires and the height of their installation for an effective shielding, as well as the masts' height to be used in the control areas with the objective to ensure and preserve the human life and the equipment's useful life. In addition to this the software tool has a validation module and a simulation module that let to evaluate the effectiveness of an existing shielding system and to simulate electrical discharges over it and to observe its behavior.

\* Final undergraduate project developed in research modality

\*\* Physics mechanical engineering faculty. Electrical, electronic and telecommunications school  
Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres. Codirector: MSc (c). Jairo Gómez Tapias

## 1. INTRODUCCIÓN

El apantallamiento es un recurso que ha sido empleado desde hace muchos años para garantizar la protección de personas, materiales y edificaciones expuestos a daños en caso de descargas atmosféricas directas, debido al impacto negativo y las repercusiones que genera este fenómeno cuando no se tiene un nivel de protección adecuado.

En subestaciones eléctricas y líneas de transmisión continuamente se presentan sobretensiones que dan origen a grandes esfuerzos en el aislamiento, razón por la cual estos elementos y equipos deben estar diseñados de forma que puedan soportar tales esfuerzos sin que su funcionamiento normal se vea afectado. Sin embargo, el origen y duración de estas sobretensiones varía dependiendo de la fuente causante del fenómeno, siendo una de estas precisamente las descargas atmosféricas, las cuáles son responsables de las sobretensiones transitorias de origen externo en el sistema.

Por lo tanto, con el fin de mantener la continuidad y disponibilidad de una subestación eléctrica, debe considerarse entre muchos otros factores, el blindaje o apantallamiento contra la incidencia directa de descargas atmosféricas a los equipos de patio y a la infraestructura civil de la instalación, que pueda ocasionar condiciones muy severas de sobretensiones sobre el aislamiento, daños costosos sobre equipos e infraestructura y/o repercusiones nefastas en la integridad humana del personal de la subestación respectivamente. [1]

## 2. GENERALIDADES DE LA FÍSICA DEL RAYO

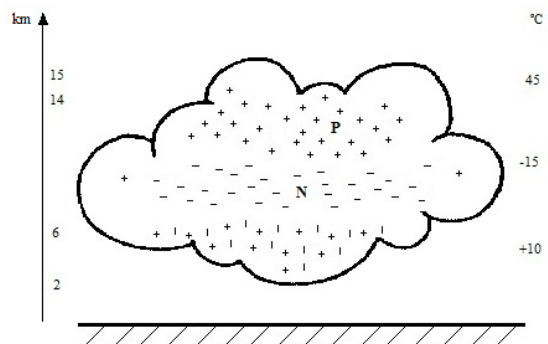
### 2.1. Distribución de cargas eléctricas en nubes de tormenta

Desde el siglo XVIII hasta la fecha se ha investigado el fenómeno natural de las descargas atmosféricas, Benjamín Franklin demostró que las nubes contenían electricidad mediante su experimento de la garita del centinela, indicando que las nubes se encontraban cargadas negativamente y en ocasiones positivamente.

El físico inglés Wilson fue el primero en realizar mediciones de campo eléctrico y tras realizar varias observaciones concluyó que la estructura básica de una nube era la de un dipolo positivo; sin embargo el físico Simpson por esa misma época llegó a la conclusión que la nube formaba un dipolo negativo. Solo cuatro décadas de observaciones y mediciones desde aquella controversia entre Wilson y Simpson se pudo demostrar que las nubes de tormentas no eran bipolares sino tripolares: existe una región de carga negativa N en el centro de la nube, con una región de

carga positiva P encima de ella y otra de menor carga debajo. [2], [3], [4], [5]

En la Figura 1 se observa la estructura tripolar de una nube tormenta, la capa negativa tiene como particularidad su forma de torta donde su espesor vertical es inferior a un kilómetro, y además puede extenderse horizontalmente varios kilómetros, con una temperatura de  $-15^{\circ}$  Celsius donde pueden presentarse las tres fases del agua, hielo-líquido y vapor [2], [3].



*Figura 1. Estructura tripolar de una nube tormenta. [1]*

### 2.2. Características de la descarga atmosférica

La descarga atmosférica es de naturaleza electrostática, debido a las cargas inducidas sobre la superficie terrestre por cargas de polaridad inversa acumulada en la nube y el salto de un arco eléctrico a una distancia crítica, en la cual el gradiente de potencial es de tal magnitud que el poder dieléctrico del aire se rompe. A medida que se incrementa la carga, el potencial entre la nube y tierra se incrementa y por consiguiente el gradiente de potencial en el aire también, cuando el gradiente excede la rigidez dieléctrica del aire, éste se ioniza y una avalancha de carga comienza de la nube hacia la tierra siendo el gradiente requerido para empezar esta avalancha del orden de 5 a 10 kV/cm. [6]

A medida que avanza el líder va formando un canal en el cual se van acumulando cargas eléctricas de la nube sin embargo, el líder se mantendrá a un potencial ligeramente inferior al de la nube. Este líder se caracteriza por avanzar siempre en una dirección descendente en forma de zigzag, con una serie de ramificaciones que se extienden hacia la tierra en pasos de cerca de cincuenta metros de largo, alargándose a medida que se aproxima a tierra y rodeado por una envoltura de corona, de esta forma, el canal formado llega a cargarse y el gradiente de potencial en la punta del líder es alto, mientras las cargas del centro de la nube sigan alimentando el líder de modo tal que mantenga su gradiente por

encima de la rigidez dieléctrica del aire, el líder continuará su camino; en caso contrario el líder cesa, la carga se disipa y por ende la descarga no es completa.

El avance del líder continúa hasta que su frente se encuentra a una distancia crítica de la superficie de la tierra, para la cual el gradiente de potencial sobre ésta ha alcanzado una magnitud tal, que la envoltura por efecto corona asociado con dicho gradiente se ha concentrado con la envoltura corona que trae el líder, obteniéndose por consiguiente la ionización total del espacio comprendido entre el frente de líder y el punto sobre la superficie de la tierra más cercano a éste; en ese momento se rompe el poder dieléctrico del aire dando lugar al nacimiento de un líder ascendente desde la tierra o rayo de retorno ocurriendo un cortocircuito eléctrico entre la carga negativa depositada en el líder y la electrostáticamente inducida de la carga positiva en la tierra ocasionando una luminosidad intensa que se ve hacia la nube a lo largo del camino y sus ramificaciones, de esta forma, la alta intensidad de corriente asociada tradicionalmente con la ocurrencia del rayo por la carga en el canal de descarga se neutraliza siguiendo generalmente una baja intensidad de corriente de duración apreciable. [6]

### 2.3. Clasificación de las descargas eléctricas

Los rayos se pueden definir como una transferencia de carga eléctrica que genera altas corrientes, transformando energía eléctrica en energía luminica (Rayo) y energía audible (Trueno). Berger en 1978 fue el primero en plantear 4 tipos de rayos en términos de la dirección del movimiento entre nube y tierra: ascendente o descendente y en términos del signo de la carga del líder que inicia la descarga: positivo o negativo [2], [3]:

- a) NTN: Nube –tierra negativa
- b) NTP: Nube –tierra positiva
- c) TNN: Tierra-nube negativa
- c) TNP: Tierra-nube positiva

En la Figura 2 se pueden apreciar cinco tipos de rayos conocidos:

- a) Dentro de la nube
- b) Entre nubes
- c) Entre nube y la ionosfera
- d) Entre nube y aire
- e) Entre nube y tierra o entre tierra y nube

La mayoría de descargas eléctricas atmosféricas, probablemente el 75% no involucran la tierra. Aunque el tipo de descarga dentro de la nube es el más frecuente (aproximadamente el 50%). Las descargas nube-tierra o tierra-nube son las más importantes ya que estas son las que causan daños a

los sistemas eléctricos y a los seres vivos siendo alrededor del 25% de las descargas. [2], [7]

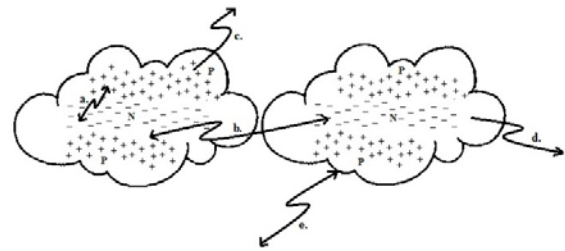


Figura 2. Descargas eléctricas atmosféricas. [1]

La polaridad de las descargas NTN están entre el 90% y 95%, para las descargas NTP entre el 5% y 10%, estos resultados se obtuvieron de las mediciones directas de Berger en el Monte San Salvatore aunque se han encontrado que en zonas tropicales existen regiones y meses donde los rayos positivos pueden ser porcentualmente más que los negativos. [2], [8], [9]. Las descargas NTN se inician en la parte baja de la nube, en la región de carga negativa, y en promedio presentan una corriente pico media de 30 kA en zona templada y 45,3 kA en zona tropical. Por el contrario, las descargas NTP son originadas en la parte superior de la nube. [2], [3].

### 2.4. Parámetros del rayo

Diversos investigadores han estudiado las descargas atmosféricas, y han establecido más de quince parámetros de dicho fenómeno. *La perspectiva temporal* significa que el rayo se caracteriza por variar en el tiempo de forma diaria, mensual, anual y multianual. *La perspectiva espacial* significa que la magnitud de los parámetros del rayo varía global y localmente, los cuales a su vez están divididos en 5 grupos como se ilustra en la Tabla 1. [2], [10], [11]

Tabla 1. Parámetros del rayo. [2]

PARÁMETROS	MAGNITUDES Y COMENTARIOS
<b>1. De incidencia</b>	
- Nivel Cerámico NC	Número de días tormentosos al año. Este parámetro es utilizado cuando no hay disponibilidad de mediciones directas de densidad de descargas a tierra.
- Densidad de descargas a tierra DDT	Número de rayos por kilómetro cuadrado-año.
- Polaridad P	Positiva o negativa
- Multiplicidad M	Número de descargas individuales por cada descarga.
- Duración	En milisegundos. Duración total del rayo o intervalo entre descargas individuales.

<b>2. Amplitud de corriente de retorno de rayo.</b>	En kA frecuentemente referenciada como el parámetro más importante para aplicaciones de ingeniería.
<b>3. Carga</b>	En Culombios. Total, primera descarga y descargas subsecuentes
<b>4. Energía</b>	En kJ/Ω
<b>5. Forma del impulso de la corriente de Rayo</b>	kA/μs. En los cuales se tienen en cuenta las características dependientes del tiempo, con énfasis en las características de la rata de ascenso de la corriente del rayo.

- **El nivel cerámico:**

Antiguamente se desarrolló un sistema de predicción del clima que incluía el conteo de truenos. Se tiene conocimiento que se crearon calendarios basados en registros históricos de truenos oídos en días específicos. El comité Meteorológico Internacional (IMC) reunido en Viena adoptó una unidad que denominó el “Día con trueno oído” donde se indica contar solamente como días de tormenta aquellos en los cuales un trueno es oído y un relámpago es observado ya que el relámpago sin trueno fue excluido para prevenir el registro de tormentas muy lejanas. [2]

A finales del siglo XIX se comenzaron a elaborar mapas donde, mediante líneas se conectaban sitios en los cuales el primer trueno era oído. Estas líneas se llamaron líneas isoceránicas, ver Figura 3. [2]

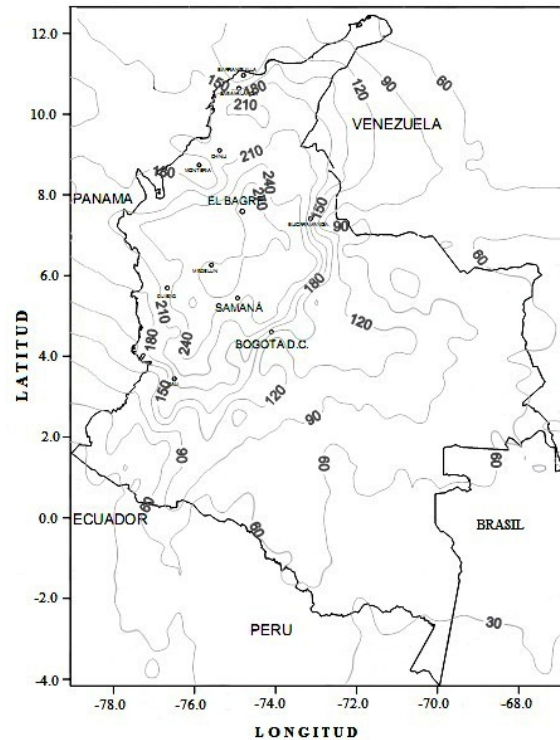
En Colombia, el estrechamiento de las cadenas montañosas, principalmente en las cordilleras orientales (Noroeste de Cundinamarca y sudoeste de Boyacá) y central (Noroeste de Caldas, sudeste de Antioquia) y los vientos que se aproximan a ellas, marcan la principal influencia en la definición del mayor o menor nivel cerámico y por tanto de la mayor actividad eléctrica atmosférica, como puede apreciarse en los gradientes altos de nivel cerámico en los pie de montes de la cordilleras. [2]

Alrededor de la Sierra Nevada de Santa Marta, en el mar Caribe, se presenta un fuerte gradiente con niveles iguales o superiores a 90 días tormentosos/año. La parte media del valle del río Magdalena se caracteriza por la presencia de un sistema con alto nivel cerámico en la región conocida como Catatumbo en la zona limítrofe con Venezuela.

La actividad de rayos en esta región llevó a Humboldt a llamar este fenómeno como el rayo del Catatumbo. [2]

- **Densidad de descargas a tierra(DDT):**

La DDT es un concepto más riguroso de la actividad eléctrica atmosférica, ya que el concepto de nivel cerámico por si solo es débil para ser capaz de dar



**Figura 3. Mapa niveles ISO-Niveles cerámicos de Colombia. [12]**

información sobre la existencia de aéreas propensas a los rayos; a pesar de esto, el nivel cerámico está directamente relacionado con la DDT mediante la ecuación (1) válida para Colombia a través de la cual es posible calcular un número de descargas por km<sup>2</sup> por año conociendo el nivel cerámico de una zona del país, siendo éste un dato fundamental al momento de simular la efectividad de un sistema de apantallamiento, teniendo en cuenta que las DDT más altas del mundo fueron encontradas en las regiones tropicales de África y al norte de los andes colombianos. [2]

$$DDT = 0,0017 * NC^{1,56} \left[ \frac{\text{Descargas}}{\text{Km}^2 * \text{año}} \right] \quad (1)$$

Donde:

NC = Nivel cerámico. [2]

- **Magnitudes de corriente de retorno del rayo:**

La amplitud de la corriente de retorno del rayo es, frecuentemente referida, como el parámetro más importante en la aplicación de la ingeniería, ya que tiene la mayor parte de aplicación en el diseño [2]. Los primeros registros de magnitud de corriente de retorno pico de rayo para un área tropical fueron realizados por Lee et al y se muestran en la Tabla 2. [13], [14]

**Tabla 2. Medianas del valor pico de la corriente de retorno del rayo en diferentes zonas del planeta adaptado de Lee et Al 1979. [2]**

País	Mediana (kA)
Estados Unidos	23
Suiza	30
Suecia	30
Polonia	31
Malasia	36
Brasil	43
Rodesia	42
Colombia	43

Las mediciones fueron realizadas en Kuala Lumpur (Malasia), por medio del método de antena aérea en campo abierto. Otras investigaciones llevadas a cabo en Estados Unidos indican que los niveles de corriente pico de retorno de rayo están en un rango de 10 a 40 kA. El valor medio reportado por esta investigación está entre el 15 a 20 kA, solo el 6% está por encima de 60 kA y menos del 2% por encima de 100 kA, sin embargo la magnitud de la rata y de la corriente pico de rayo varía de acuerdo a la localización geográfica como lo sostiene la norma norteamericana IEEE Std C62.72-2007. [2], [15]

### 3. MÉTODOS DE APANTALLAMIENTO EN SUBESTACIONES

La protección contra descargas atmosféricas se consigue por medio un blindaje el cual consiste en una malla compuesta por cables de guarda que se sitúa sobre las estructuras de apoyo de la subestación. Siempre el blindaje debe estar conectado al sistema de puesta a tierra de la subestación, haciendo que la corriente del rayo que impacta se disperse sin causar daños térmicos, electrodinámicos o mecánicos, ni chispas peligrosas. La carencia de un apantallamiento efectivo de una subestación se evidencia en los siguientes efectos: [16]

- Creación de diferencias de potenciales entre elementos metálicos de la subestación.
- Efectos térmicos: Que producen puntos de fusión debido a las altas temperaturas en el momento de la descarga del rayo en el material de los conductores y en los dispositivos que presentan un falso contacto.
- Efectos electrodinámicos: Surgen fuerzas de repulsión y atracción en conductores y dieléctricos muy cercanos, afectados por la descarga.
- Efectos acústicos: El trueno se debe a una brusca elevación de presión (2 a 3 atmósferas) del canal de descarga contraído por las fuerzas electrodinámicas durante la duración de la descarga.

- Efectos de inducción: El acercamiento de un rayo y su descarga a través de los conductores crea un flujo magnético que genera tensiones inducidas elevadas en las líneas de transmisión y distribución, que están partiendo de la subestación.
- Efectos luminosos: Deslumbramiento de proximidad que provoca durante algunos segundos pérdida de visión.
- Efectos indirectos: potenciales desfasados o tensiones de paso y contacto peligroso, en el área donde esté ubicada la subestación, así como el perímetro metálico que lo rodea.

La norma IEEE Std 998 (1996) establece los modelos y métodos que son ampliamente utilizados para el diseño del apantallamiento contra descargas atmosféricas en subestaciones eléctricas, los cuales se mencionan a continuación: [17], [18]

- Modelo electrogeométrico.
- Método de los ángulos fijos.
- Método de las curvas empíricas.

En la década de 1950 en los Estados Unidos se presentaron salidas excesivas en las líneas de transmisión de 345 kV, lo que demostró que ni el método de ángulos fijos, ni el método empírico de protección eran adecuados para el diseño del sistema de protección contra descargas atmosféricas directas, propiciando de esta manera la afirmación del modelo electrogeométrico como una mejor alternativa, el cual se basa en el criterio de que todo conductor cargado ejerce una atracción sobre el líder de la descarga y dicho efecto es proporcional a la magnitud de la corriente de la descarga. [18], [19], [20].

Conforme al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE, el diseño debe realizarse aplicando un método reconocido por normas técnicas internacionales como la IEC 62305-3, de reconocimiento internacional, las cuales se basan en el modelo electrogeométrico. [21].

#### 3.1 Método de la esfera rodante

Gilman y Whitehead desarrollaron un sistema analítico referido a un modelo electrogeométrico (EGM) para determinar la efectividad de los apantallamientos. Una aplicación de este modelo es el método de la esfera rodante cuyo alcance es válido únicamente para simular las descargas atmosféricas descendentes. Su principal ventaja consiste en facilitar el diseño de los sistemas de apantallamiento para estructuras con un nivel de dificultad mayor que el de las líneas de transmisión.

Este método está basado en el criterio de protección mediante círculos de radios iguales a la altura sobre el

suelo del hilo de guarda, usando la representación de una descarga atmosférica como si fuera una esfera imaginaria de radio  $S_m$  que rueda sobre la superficie de la subestación y en cuyo recorrido es soportada por mástiles, cables de guarda y todo objeto metálico aterrizado que tenga una altura considerablemente mayor a las estructuras ubicadas a su alrededor y pueda ofrecer apantallamiento contra dichas descargas; a medida que la esfera va girando a lo largo de la superficie de la subestación su contorno demarca un área (igualmente imaginaria) sobre los objetos que la han sostenido a lo largo de su trayecto.

El área delimitada comprende los puntos espaciales que la descarga eléctrica puede alcanzar e impactar. Teniendo en cuenta el equivalente geométrico de las características de la descarga atmosférica, en el cual la posición del líder descendente de la descarga se representa mediante el centro de la esfera, y a su vez, la longitud del último paso del líder (distancia crítica) se representa mediante el radio de la esfera; puede afirmarse que si la esfera logra tocar algún punto de la zona a proteger durante su recorrido, cualquier elemento dentro de dicha zona se encontrará expuesto a que una descarga atmosférica incida directamente sobre él.

Por lo tanto, lo ideal es que la ubicación de los objetos de captación de las descargas, permita que el contorno de la esfera quede por encima de la zona a proteger, impidiendo de esta forma que algún punto de ésta zona quede vulnerable a sufrir daños de este tipo [18].

En la Figura 4 [18], se ilustra el concepto de la esfera rodante de radio igual a la distancia de descarga  $S_m$ :

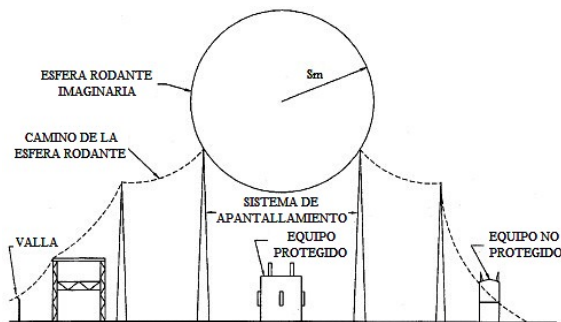


Figura 4. Método de la esfera rodante. [18]

- **Distancia de descarga crítica**

Para el modelado de la esfera y su relación con los parámetros de la descarga eléctrica se comienza por definir el radio que tendrá la esfera que “rodará” sobre la superficie de la subestación, el cual está relacionado directamente con el valor de la corriente

pico de retorno de la descarga (corriente de diseño del apantallamiento) tal como lo indica la ecuación (2):

$$S_m = 8 * k * I_s^{0,65} \quad [kA] \quad (2)$$

Donde:

$S_m$  = Distancia crítica de descarga en metros.

$k$  = Coeficiente que tiene en cuenta las diferentes distancias de descarga.

a) Para cables de guarda,  $k=1$

b) Para mástiles y puntas de pararrayo,  $k=1,2$

$I_s$  = Corriente pico de retorno de la descarga en kilo Amperes. [18]

- **Corriente de diseño**

La corriente de diseño ( $I_s$ ) es la corriente a partir de la cual el sistema podría presentar fallas en su aislamiento en caso de incidir sobre un equipo una descarga eléctrica con un valor de corriente pico igual o mayor a  $I_s$ . Teniendo en cuenta el nivel de aislamiento al impulso atmosférico que tienen los equipos de la subestación y la impedancia característica de la línea de transmisión se puede calcular  $I_s$  como:

$$I_s = \frac{1,1 * BIL}{(Z_s / 2)} = \frac{2,2 * BIL}{(Z_s)} \quad [kA] \quad (3)$$

Donde:

$BIL$  = Nivel Básico de Aislamiento en kV.

$Z_s$  = Impedancia característica de los conductores. en  $\Omega$ . [18]

- **Impedancia característica de los conductores**

La impedancia característica del conductor de fase, se calcula como:

$$Z_s = 60Ln \frac{2 * H}{r_e} \quad [\Omega] \quad (4)$$

Donde:

$r_e$  = Radio externo del conductor de fase en metros, ó

$r_e$  = Radio medio geométrico del haz de conductores metros.

$H$  = Altura efectiva del conductor en metros. [22]

- **Altura efectiva del conductor**

La altura efectiva ( $H$ ) para el conductor de fase de la línea dentro del patio, se calcula como:

$$H = H_t - \frac{2}{3} * f \quad [m] \quad (5)$$

Donde:

$H_t$  = Altura de remate del conductor en la estructura de apoyo en metros.

$f$  = Flecha del conductor en metros. [22]

### 3.2 Objeto apantallador

La escogencia de los cables de guarda para apantallar los patios de las subestaciones obedece a las ventajas que estos presentan frente a los demás dispositivos de apantallamiento [23], las cuales son principalmente:

- Permitir el apantallamiento de grandes áreas
- El costo de instalación es bajo, ya que se utilizan conductores livianos que requieren tensiones de mecánicas bajas, por lo que no requieren estructuras muy fuertes.
- Las estructuras de retención se pueden ubicar relativamente alejadas unas de otras (60 o más).
- La corriente del rayo se divide en dos direcciones, con lo cual la corriente que debe disipar cada estructura se reduce aproximadamente a la mitad.
- La impedancia característica presentada al rayo es notablemente inferior (cerca de la mitad de la que presentaría una sola estructura), reduciendo así la inductancia de la estructura y, en consecuencia, el riesgo de flameo inverso en los dos aisladores en suspensión, fenómeno que se puede producir cuando hay descargas repetidas a través del mismo canal ionizado por el rayo.
- La presentación de los cables de guarda no contrasta con las líneas por lo que no desmejora la estética de la subestación.
- Mejora las condiciones de la malla a tierra al disipar parte de la corriente de secuencia cero en casos de cortocircuito a tierra.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE EN MATLAB.

En este documento se resume la implementación de la metodología aplicada en una herramienta software desarrollada en MatLab para el cálculo prototipo del apantallamiento contra descargas atmosféricas directas en subestaciones eléctricas utilizando como metodología de cálculo el establecido en el modelo electrogeométrico en la etapa de diseño y validación y el método de montecarlo en la etapa de simulación. Además, se incluye la implementación de la metodología para el cálculo del apantallamiento de la zona de control (caseta) basado en lo establecido por la Norma Técnica Colombiana NTC 4552.

### 4.1. Diseño

- Metodología establecida para el diseño de apantallamiento en subestaciones, basada en el método de la esfera rodante

En la etapa de diseño, la herramienta software propuesta, calcula la longitud de los castilletes de los cables de guarda, dependiendo de la ubicación que se le dio al momento del ingreso de los mismos al sistema implementado que modela la subestación en la herramienta. Basado en el método de la esfera rodante y empleando las ecuaciones (2) y (5), la herramienta calcula el radio de la esfera rodante y procede a simular su rotación a lo largo y ancho del espacio perimetral demarcado por los pórticos. Teniendo en cuenta, que es dentro del área comprendida entre los pórticos donde se encuentran los equipos a proteger, ésta área se convierte en un volumen, asumiendo su altura igual a la altura del objeto energizado más alto que se encuentre en el patio, el cual por lo general es la línea de transmisión que se conecta del pórtico a la barra.

Para poder simular el movimiento de la esfera y conocer las coordenadas espaciales del punto o puntos de contacto con el sistema de blindaje; o en el peor de los casos con el volumen de protección para cada punto de ubicación de la esfera, se adelanta un movimiento discreto del centro de ésta dentro del área de protección mencionada anteriormente, teniendo en cuenta, que una esfera proyectada en un plano de dos (2) dimensiones visto desde cualquier punto del espacio es un círculo.

Con base en lo anterior, y ubicando una vista de planta (llamada en adelante plano  $x$ - $y$ ) del patio a apantallar, para cada punto en dicho plano se podrá conocer si la esfera tiene o no contacto con cada uno de los cables de guarda localizando los puntos de intersección entre un círculo de radio  $r$  y una recta con pendiente  $m$  y desplazamiento  $b$ , que representa la vista de planta de un cable de guarda. Las ecuaciones (6) y (7) definen la proyección de la esfera y el cable de guarda en el plano  $x$ - $y$ :

$$Y_1(x) = m * x + b \quad [m] \quad (6)$$

$$Y_2(x) = \sqrt{r^2 - (x - x_e)^2} + y_e \quad [m] \quad (7)$$

Donde:

$m$  = Pendiente de la recta

$b$  = Desplazamiento de la recta

$r$  = Radio de la esfera

$x_e$  = Coordenada en  $x$  del centro de la esfera

$y_e$  = Coordenada en  $y$  del centro de la esfera

Por lo que al igualar  $Y_1(x)$  con  $Y_2(x)$  se encontrarán los valores de  $(x)$  donde los dos objetos hacen contacto, separando aquellos valores que no estén dentro del dominio de los límites que describen al cable de guarda. Este proceso se realiza para cada uno de los cables de guarda en cada nueva posición que tome el centro de la esfera en el plano  $(x-y)$ .

Una vez conocido el rango de valores de  $(x)$  para los cuales la esfera podrá tener contacto con el cable de guarda, se define la altura a la cual este ocurre, teniendo en cuenta que la altura a calcular debe ser la máxima, debido a que la descarga eléctrica (representada por la esfera) golpeará el primer objeto que encuentre a su paso, a una distancia igual o menor a la distancia crítica (representada por el radio de la esfera). Esto indica que la esfera hará el primer contacto con un único punto del rango encontrado, para el cual el valor de la coordenada  $(z)$  del centro de la esfera será mayor en comparación con el resto de valores del rango. Para encontrar este valor de la coordenada  $(z)$  deberá considerarse tanto la esfera como el cable de guarda en un plano perpendicular al plano  $(x-y)$ .

Las ecuaciones (8) y (9) representan al cable de guarda y a la esfera como una parábola y media circunferencia en el plano  $(x-z)$  respectivamente,

$$Z_1(x) = k_1 * (x-a)^2 + z_b \quad [m] \quad (8)$$

$$Z_2(x) = -\sqrt{r^2 - (dist)^2} \quad [m] \quad (9)$$

Donde:

$k_1$  = Factor de apertura de la parábola.

$a$  = Desplazamiento en  $x$  de la parábola en metros.

$z_b$  = Desplazamiento en  $z$  de la parábola en metros.

La variable  $dist$  de la ecuación (9) hace referencia a la distancia existente en el plano  $(x-y)$  entre el centro de la esfera  $(x_e, y_e)$  y el punto de contacto entre esfera y cable de guarda  $(x_p, y_p)$ , descrita por la ecuación (10):

$$dist = \sqrt{(x_p - x_e)^2 + (y_p - y_e)^2} \quad [m] \quad (10)$$

Y en general,

$$dist = \sqrt{(x - x_e)^2 + ((m * x + b) - y_e)^2} \quad [m] \quad (11)$$

La ecuación (11) muestra de manera general para cualquier punto de contacto con coordenadas  $(x, y)$ , la distancia  $dist$  a utilizar en la ecuación (9), con el fin

de obtener el verdadero valor de  $Z_2(x)$ ; reemplazando  $dist$  de la ecuación (11) en la ecuación (9),  $Z_2(x)$  quedaría reescrita como:

$$Z_2(x) = -\sqrt{r^2 - ((x - x_e)^2 + (m * x + b - y_e)^2)} \quad [m] \quad (12)$$

Con el fin de encontrar el máximo valor de  $z$  para el cual la esfera y el cable de guarda harán contacto evaluando los valores de  $x$  del rango encontrado, se igualan las ecuaciones (8) y (12), y luego se igualan a cero formando una nueva función  $Z(x)$  como se ve en la ecuación (13):

$$Z_1(x) = Z_2(x)$$

$$Z(x) = Z_1(x) - Z_2(x) \quad (13)$$

Se procede a encontrar sus máximos:

$$\frac{\partial Z(x)}{\partial x} = 2 * k_1 * (x-a) - \frac{1}{2} * \left[ \frac{2 * (x - x_e) + 2 * m * (x + b)}{\sqrt{r^2 - ((x - x_e)^2 + (m * x + b - y_e)^2)}} \right]$$

$$2 * k_1 * (x-a) - \left[ \frac{(x - x_e) + m * (x + b)}{\sqrt{r^2 - ((x - x_e)^2 + (m * x + b)^2)}} \right] = 0 \quad (14)$$

Resolviendo la ecuación (14) se encuentra un polinomio de cuarto grado de la forma:

$$a_1 x^4 + a_2 x^3 + a_3 x^2 + a_4 x + a_5 = 0$$

que tendrá 4 raíces que serán discriminadas, según pertenezcan o no al rango encontrado para valores de  $(x)$  dentro de los cuales haya posibilidad de contacto con la esfera según el análisis inicial. Conforme con esto, el valor de  $(x)$  a seleccionar como coordenada  $(x)$  del punto de contacto será aquel para el cual  $Z(x)$  tenga su valor máximo, de esta forma en cada posición de la esfera se calcula la altura sobre el suelo a la cual los cables de guarda interceptan la esfera, o bien, la posición en la cual la esfera se intercepta en un punto muy bajo de modo tal que hace contacto con el volumen de protección. Al presentarse este último caso, será necesario incrementar la altura de los castilletes en un valor igual a la diferencia entre el punto más bajo de la esfera y la altura del volumen de protección, siempre y cuando, la nueva longitud no sobrepase su valor práctico máximo, ya que de ser así, se deberá proceder a reubicar los cables de guarda previamente instalados.

Por otra parte, también podría darse el caso en que la esfera caiga completamente dentro de la zona de protección sin que ningún objeto apantallador haga

contacto con ella; representando así, una falla del sistema de apantallamiento.

Para estos dos últimos casos la herramienta software presenta al usuario en el dibujo 3D los puntos en los cuales se tienen inconvenientes con el apantallamiento, bien sea por una mala ubicación de los cables de guarda o por una longitud muy baja de sus castilletes. Además, le brinda la opción de tomar las medidas correctivas pertinentes en cada caso.

Al finalizar la etapa de diseño, al igual que en las otras etapas, la herramienta exporta los resultados del análisis a un documento de texto, crea también los documentos de texto que contienen la información física (del terreno) y eléctrica (de cada patio) ingresada, y los guarda junto con el dibujo 3D en una carpeta con el nombre del proyecto, de modo que puedan ser empleados al momento del montaje real del sistema de blindaje y/o en caso de querer reevaluar el sistema posteriormente.

#### 4.2. Validación

- **Metodología de validación**

Esta etapa se enfoca en la verificación de la efectividad del sistema de apantallamiento de una subestación mediante la simulación del método de la esfera rodante sobre el área de sus patios y cuya metodología para encontrar los puntos de contacto de la esfera con el sistema de apantallamiento es la misma que para la funcionalidad de diseño.

En esta funcionalidad la herramienta software entrega al usuario el resultado de la efectividad del sistema de apantallamiento ingresado (ubicación de los cables de guarda y la altura de sus soportes) mostrando una efectividad igual a 1 para el caso en que se tenga un apantallamiento efectivo, y una efectividad igual a 0 para el caso contrario. Además de esto, el software sugiere al usuario la acción correctiva a tomar para el caso en que el apantallamiento no sea efectivo, bien sea mediante el incremento de la longitud de los castilletes o el incremento de la cantidad de cables de guarda a instalar.

Por otra parte, éste módulo será de vital importancia en la etapa posterior a este proyecto, en la cual se verificarán los sistemas de apantallamiento de diferentes subestaciones del territorio nacional.

#### 4.3. Simulación

- **Metodología de simulación**

Esta etapa, establece una noción gráfica de la efectividad que tendrá un sistema de apantallamiento a través de la simulación de descargas atmosféricas

que inciden directamente sobre los patios de la subestación, ya sea:

- a. Establecido con la herramienta software propuesta.
- b. Por un sistema existente cuyos datos han sido ingresados a esta.

Empleando para esto, el método de montecarlo, creando valores aleatorios de corriente basado en la probabilidad de ocurrencia de descargas atmosféricas con determinados valores de corriente pico en Colombia.

Durante la etapa de diseño del apantallamiento se calcula el valor de la corriente pico de retorno  $I_s$ ; a partir de la cual, el sistema de apantallamiento deberá blindar los equipos de la subestación y protegerlos ante la incidencia de descargas eléctricas directas cuya corriente pico de retorno sea mayor a ese valor; aquellas descargas con un valor de corriente pico de retorno menor a  $I_s$  podrán penetrar el sistema de apantallamiento e incidir sobre algún equipo o barra sin ocasionar daños, dado que su nivel de aislamiento al impulso atmosférico está diseñado para soportar las sobretensiones que estas corrientes puedan generar.

Para conocer el número de descargas directas que inciden sobre una zona específica cada año, se recurre a los valores de las DDT estipuladas para la mayor parte de las regiones del país, sin embargo estas regiones son muy extensas y resultan ser mucho mayores al área de la subestación. Con el fin de hacer una simulación más drástica y someter al sistema de apantallamiento a situaciones más exigentes, se ha asumido que el área de incidencia de las descargas descritas por cada nivel DDT sea igual al área de cada patio de la subestación, lo cual indica que todas las descargas caerán sobre dicha área. Dada la ecuación:

$$TES = DDT * A * P(I_s) \quad [1/\text{año}] \quad (15)$$

Donde:

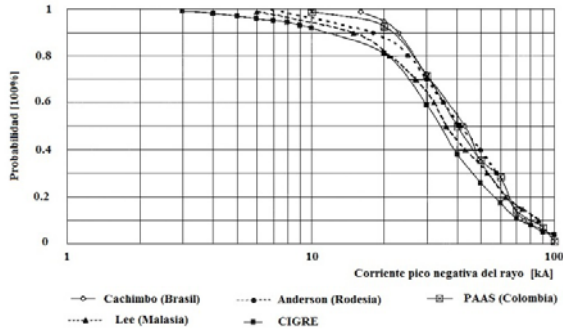
$DDT$  = Descargas directas a tierra para la región en donde se ubica la subestación dada en descargas por  $\text{km}^2$  por año.

$A$  = Área de incidencia de las descargas atmosféricas en  $\text{km}^2$ .

$P(I_s)$  = Probabilidad de ocurrencia de una descarga eléctrica cuyo valor de corriente pico de retorno en kA sea menor a  $I_s$ . [17]

La Figura 5 [2] presenta las curvas de probabilidad de los valores pico de corriente de retorno para las descargas eléctricas, en donde se presentan los valores de probabilidad para el cual las corrientes pueden ser mayores al valor de corriente analizado.

Con el fin de obtener una ecuación aproximada de la curva de probabilidad de la Figura 5 para el caso Colombiano (de investigación sobre adquisición y análisis de señales-PAAS) y asumiendo la variación estadística para los valores de la corriente  $I_s$ , la función error  $erf(u)$  (Figura 6) resulta de mucha utilidad aprovechando la distribución normal con una desviación estándar de las corrientes de descarga atmosférica medidas en el estudio de las zonas tropicales presentadas en la Figura 5.



**Figura 5. Probabilidad de la corriente pico de retorno de rayo para diferentes latitudes. [2]**

Debido a que esta distribución se obtuvo de forma experimental, ubicando medidores en diferentes puntos, no hay una ecuación que describa el comportamiento exacto de la curva, por lo tanto para efectos prácticos del presente proyecto se obtuvieron los parámetros estadísticos para aproximar la curva de probabilidad de corriente pico de retorno en dos tramos, utilizando valores medios y de desviación estándar que resultan en una muy buena aproximación como se puede ver en la Figura 7, de esta forma, la probabilidad de que ocurra una descarga eléctrica cuya corriente pico de retorno sea mayor al valor de  $I_s$  es:

$$P(I_s) = 0,5 * [1 - erf(u)] \quad (16)$$

$$u = \frac{Ln(I_s) - Ln(I_m)}{\sqrt{2} * \sigma} \quad (17)$$

Donde:

$I_s$  = Corriente de protección en kA.

$I_m$  = Valor medio de la corriente pico de retorno en kA .

$\sigma$  = Desviación estándar del logaritmo natural de la corriente pico de retorno  $Ln(I)$ . [8], [17]

Los parámetros estadísticos de la corriente pico de retorno para la aproximación, se establecen para dos tramos de la curva de probabilidad de la corriente pico de retorno, como se observa en la Figura 7. Para el caso colombiano los parámetros estadísticos de la

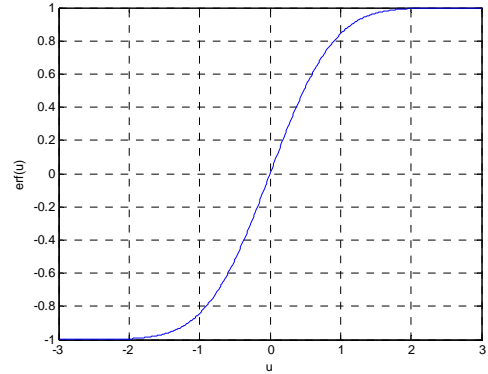
corriente pico de retorno son:

- a. Para corrientes menores o iguales a 20 [kA]:

$$I_m = 55,5 \quad \sigma = 0,72$$

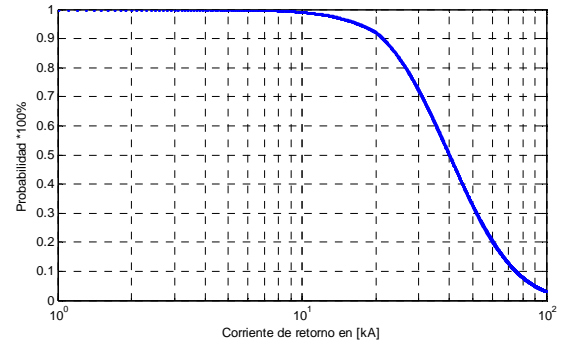
- b. Para corrientes mayores a 20 [kA]:

$$I_m = 40 \quad \sigma = 0,49$$



**Figura 6. Función error  $erf(u)$ . [8]**

De esta forma se obtiene una aproximación para la curva de probabilidad de la corriente pico de retorno en Colombia, la cual se muestra en la Figura 7:



**Figura 7. Aproximación de la curva de probabilidad de corriente pico de retorno para Colombia. [1]**

Sin embargo, para efectos del cálculo de la Tasa Específica de Salida (TES) se necesita la probabilidad de ocurrencia de descargas atmosféricas, cuyo valor de corriente pico de retorno sea menor al valor de  $I_s$ , ya que serán estos valores de corriente los que posiblemente penetren el apantallamiento propuesto y terminen ocasionando una salida en alguna bahía de la subestación, registrado en indicador de la TES por año.

Por lo tanto, para el cálculo de la TES, la probabilidad de  $P(I_s)$  se calcula como lo indica la ecuación (18), conservando los mismos parámetros estadísticos válidos para la ecuación (16):

$$P(I_s) = 0,5 * [1 + erf(u)] \quad (18)$$

Las descargas atmosféricas simuladas en el área de cada patio para un año cuyo valor de corriente pico de retorno sea menor que  $I_s$  y penetren el blindaje, se convertirán en la tasa efectiva de salida y será el número de veces que el blindaje es penetrado durante un año.

Teniendo en cuenta la distribución de las corrientes de retorno de las descargas atmosféricas y la corriente de diseño  $I_s$ , puede notarse que la probabilidad de que la tasa efectiva de salida (TES) sea mayor, se incrementa conforme  $I_s$  es mayor, lo cual ocurre a medida que el nivel de tensión del patio aumenta.

A nivel de la herramienta software, esta funcionalidad muestra de forma gráfica los puntos en los cuales han impactado las descargas simuladas, bien sea en el suelo o en los cables de guarda según sea su valor y ubicación, indicando mediante colores aquellas descargas que han penetrado el apantallamiento y no son peligrosas (color verde), y diferenciándolas además, de aquellas que si lo son (color rojo); las cuales se convierten en la tasa efectiva de salida y la tasa efectiva de fallas (TEF) respectivamente, donde ésta última representa el número de rayos que penetran el apantallamiento y cuya corriente pico de retorno es mayor a  $I_s$ .

Por otra parte, en el documento de texto que contiene los resultados, se relacionan los valores de la TES teórica con los valores de la TES calculada mediante la simulación empleando el método de montecarlo, al igual que la TEF por año del sistema de apantallamiento.

#### 4.4. Apantallamiento del área de control de la subestación (Caseta)

- **Metodología apantallamiento área de control**

El método seleccionado para llevar a cabo el diseño del apantallamiento de la caseta de control de la subestación, es uno de los establecidos por la Norma Técnica Colombiana NTC 4552, la cual dispone del uso de mástiles y la aplicación del método de ángulos fijos, el cual se utiliza para los casos donde la estructura a proteger corresponde a estructuras sencillas o pequeñas partes de grandes superficies.

Es importante definir que el método de los ángulos fijos no es el apropiado para apantallar cuando se tienen estructuras cuyo tamaño es mayor que el radio de la esfera rodante de acuerdo con el nivel de protección previamente establecido para los patios de la subestación, el nivel de protección se obtiene de la evaluación del nivel de riesgo, como se establece en la norma NTC 4552-2.

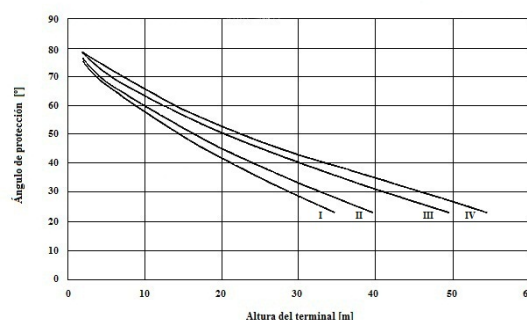
Para la herramienta software implementada, el valor de nivel de protección debe ser establecido por el

usuario, ya que este valor es requerido como un dato de entrada de la herramienta, con el fin de calcular el radio de la esfera tal como lo indica la Tabla 3. [24]

El diseñador es libre de seleccionar el valor del ángulo de protección, de acuerdo con la altura establecida del elemento a apantallar, teniendo en cuenta que los ángulos seleccionados deben ser inferiores a los indicados en la Figura 8 [24].

**Tabla 3. Valores máximos del radio de la esfera rodante según el nivel de protección. [24]**

Nivel de Protección	Radio de la esfera [m]
Nivel I	35
Nivel II	40
Nivel III	50
Nivel IV	55



**Figura 8. Ángulo de protección en función de la altura relativa y el nivel de protección. [24]**

- **Datos de entrada**

Para el proceso de cálculo del área de protección del mástil, la herramienta propuesta solicita al usuario la siguiente información de entrada:

- Dimensiones de la caseta.
- Nivel de protección.
- Ángulo de protección
- Longitud máxima de los mástiles

- **Cálculo del número de mástiles**

Con los datos de entrada, la herramienta software propuesta calcula el número de mástiles necesarios para el apantallamiento del largo de la caseta, como lo establece la Figura 9, teniendo en cuenta que:

- El apantallamiento es efectivo cuando la estructura a proteger se encuentra dentro del volumen de protección.
- El apantallamiento es efectivo cuando un mástil de longitud  $h$  con un ángulo de apantallamiento  $\alpha$  cubre una longitud igual a  $2x$ , donde  $x$  está dada por la ecuación (19) como:

$$x = h_{\max} * \operatorname{Tg}(\alpha) \quad [m] \quad (19)$$

Donde:

$h_{\max}$  = Longitud máxima comercial de un mástil en metros.

$\alpha$  = Ángulo de protección del mástil en grados. [24]

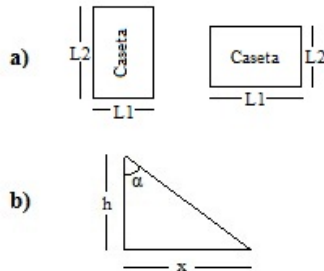


Figura 9. a) Área de la caseta. b) Ángulo de protección de un mástil. [1]

c) El usuario de la herramienta debe tener conocimiento de la longitud de los mástiles que ofrece el mercado

Al definirse la longitud máxima del mástil propuesto para el apantallamiento, la herramienta calcula la máxima longitud de cobertura que puede tener el mástil; seccionando el largo de la caseta en  $2x$  veces y aplicando la función parte entera a dicho cociente se encuentra el número de mástiles que debe ser instalados para cubrir la longitud  $L$ , como lo muestra la ecuación (20):

$$n = \left\lceil \frac{L}{2 * h_{\max} * \operatorname{Tg}(\alpha)} \right\rceil \quad (20)$$

Donde:

$L$  = Largo de la caseta en metros. [1]

El cálculo de la altura mínima que deberá tener cada uno de los  $n$  mástiles se obtiene mediante la ecuación (21):

$$h_{\min} = \frac{L}{2 * n * \operatorname{Tg}(\alpha)} \quad [m] \quad (21)$$

Donde:

$h_{\min}$  = Longitud mínima seleccionada para el mástil en metros. [1]

Es de destacar, que en caso de que la longitud mínima estimada no resulte ser una longitud comercial, se deberán seleccionar mástiles cuya longitud comercial sea la inmediatamente más cercana, por encima del valor obtenido.

El mismo procedimiento se adelanta para el apantallamiento del ancho de la caseta, prevaleciendo como longitud final de los mástiles la que resulte mayor luego de realizar los dos cálculos.

Una vez finalizado el diseño, la herramienta software entrega al usuario como resultado la cantidad de mástiles a instalar, su longitud mínima, la separación entre mástiles en un archivo de texto junto con una figura donde se muestra la vista de planta del techo de la caseta de control indicando el lugar donde se ubican los mástiles.

## 5. EJEMPLO DE CÁLCULO Y RESULTADOS

Para percibir el proceso establecido en la herramienta propuesta, se considera un ejemplo, en el que se debe validar y calcular el sistema de apantallamiento para una subestación transformadora, la cual cuenta con 3 niveles de tensión: 230/115/34,5 kV y una potencia de transformación de 150 MVA.

La información básica de entrada de la subestación que se necesita para adelantar el proceso de validación, se resume en la Tabla 4:

Tabla 4. Información básica de entrada de la subestación a validar. [1]

Patio de la S/E	No 1	No 2	No 3
Tensión. kV	230	115	34,5
BIL corregido. kV	1050	550	200
Dist. mínima f-t. m	2,20	1,10	0,52
Flecha máxima. m	1	0,7	0,3
Radio del conductor de fase. m	0,015	0,010	0,007
Altura de los pórticos. m	15-19-20	12	10
Altura del elemento energizado más alto. m	16	12	10
Longitud de los castilletes. m	5	3,2	1,5

Una vez realizada la instalación de la herramienta software en el equipo de computo, se accede desde el prompt (>>) de MatLab escribiendo p1 y pulsando la tecla Enter, lo cual desplegará la ventana **p1** y luego la **p2**.

Las anteriores ventanas contienen la información de la presentación formal de la herramienta, luego de oprimir el botón **Continuar** en la ventana **p2**, se desplegará la ventana **selección** en la cual el usuario selecciona si desea crear un proyecto nuevo o cargar la información de un proyecto creado con anterioridad, ingresando el nombre del proyecto para cualquiera de los dos; en este caso se trata de un proyecto nuevo, por lo tanto se ingresa el nombre del proyecto y se crea automáticamente una carpeta con este nombre, en donde posteriormente se guardarán los archivos de texto que genera la herramienta. A su

vez, se despliega la ventana *p3* en la cual se ingresan los datos del terreno donde se ubica la subestación como se muestra en la Figura 10.

Es de destacar que el usuario debe establecer una ubicación imaginaria de los patios de la subestación sobre un eje de coordenadas *x-y*, en el cuadrante positivo, para de esta manera establecer las coordenadas de referencia de ubicación de los patios de la subestación; e ingresarlas a la herramienta.

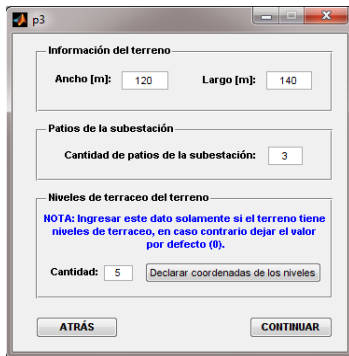


Figura 10. Ingreso de datos del terreno. [1]

Para el ejemplo, se estima que el terreno donde se instala la subestación no es completamente plano, si no que cada patio se ubica sobre diferentes niveles, ya que el terreno presenta diferentes niveles de terracedo a lo largo del eje *y* (a lo largo del desarrollo físico de la subestación), las coordenadas correspondientes a estos niveles se pueden ver en la Tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas de los niveles de terracedo del terreno. [1]

Coordenada Y inicial [m]	Coordenada Y final [m]	Altura sobre el nivel de referencia [m]
0	15	8,5
15	40	5,5
40	70	3,5
10	115	1
115	140	0

Estas coordenadas deben ser declaradas indicando el número de niveles y posteriormente oprimiendo el botón **Declarar coordenadas de los niveles**. Esta acción desplegará la ventana *niveles* en la cual se ingresa dicha información.

Luego de ingresar las coordenadas de todos los niveles de terracedo (incluyendo el nivel de referencia), se vuelve a abrir la ventana *p3* y a continuación se deberá oprimir el botón **Continuar**, para desplegar la ventana *p4* donde se ingresa la información correspondiente al primer patio a pantalla como se muestra en la Figura 11.

La información a ingresar en *p4* es la siguiente:

- Nivel de tensión del patio.
- BIL (corregido por altura).
- Distancia mínima fase-tierra.
- Altura del elemento energizado de mayor altura.
- Flecha máxima del conductor de fase de la línea.
- Número de conductores por fase.
- Radio del conductor de fase de la línea.
- Espaciamiento entre conductores del haz.
- Cantidad de pórticos de la subestación.
- Longitud máxima para los castilletes.

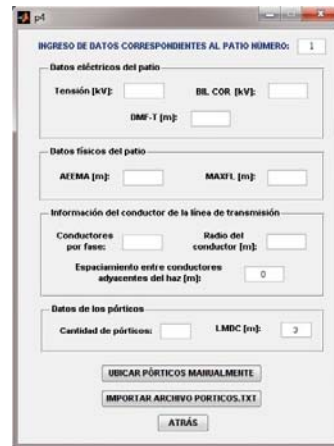


Figura 11. Ingreso de datos del patio. [1]

Luego de ingresar todos los datos, se selecciona la forma de ingreso de las coordenadas de los pórticos, en caso de seleccionarse el ingreso mediante la importación del documento de texto que contiene esta información se oprime el botón **Importar archivo pórticos.txt**; en caso de optar por el ingreso de forma manual, se oprime el botón **Ubicar pórticos** para que se despliegue la ventana *p5* para declarar las coordenadas y la altura de los puntos de apoyo de los pórticos en el plano cartesiano imaginario del terreno en el cual también se podrá introducir la altura de los castilletes de los pórticos en caso de conocerse, de lo contrario se deberá dejar el valor por defecto, es decir, cero (0), como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Ingreso de las coordenadas de los apoyos. [1]

En este caso se importa el archivo de texto que previamente debe haber sido editado, ingresando la información de cada pórtico a instalar. Una vez hecho esto, la herramienta realiza automáticamente los cálculos de la ubicación los cables de guarda que encierran el contorno del patio de la subestación y los muestra al usuario en un dibujo 3D acompañado de los pórticos y sus respectivos castilletes que tendrán una altura inicial igual a la distancia mínima fase-tierra en caso que se esté realizando el diseño, o como en este caso, la altura de los castilletes ingresada en el archivo de texto.

La herramienta calcula los datos eléctricos para el proceso de apantallamiento, y lleva a cabo un estimado de la separación máxima recomendada y la separación máxima de diseño que podrían tener los cables de guarda adyacentes entre sí, con el fin de aprovechar la longitud inicial de cálculo de los castilletes (igual a la distancia mínima fase-tierra) y la longitud máxima para un castillete en ese patio (declarada en *p4*) respectivamente con el fin de lograr un apantallamiento efectivo. Esta información será de gran utilidad al usuario en la etapa de diseño; aunque para la etapa de validación podría ser descartada debido a que en este caso se pretende ingresar un sistema que ya está diseñado; sin embargo, puede darle una noción al usuario acerca de los resultados que obtendrá al validar su sistema comparando los datos recomendados por la herramienta y los datos con los que cuenta el diseño del sistema a validar. Esta información se muestra en la ventana *info* como se ve en la Figura 13.

Una vez el usuario ha tenido en cuenta estas estimaciones, debe decidir entre dos opciones para el ingreso de las coordenadas de los puntos de apoyo de los cables de guarda a instalar, puede importar el archivo de texto *cables.txt* oprimiendo el botón **Importar archivo cables.txt** y el software cargará automáticamente la información contenida en él, de lo contrario, si opta por la instalación manual de los cables de guarda, debe oprimir el botón **Instalar cables de guarda manualmente** para desplegar la ventana *p6*.

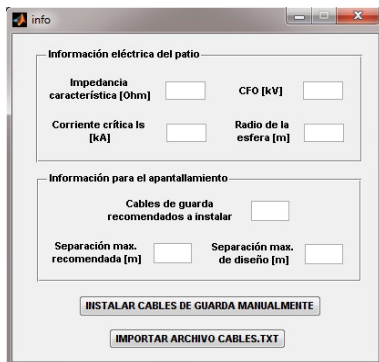


Figura 13. Ventana info. [1]

En la ventana *p6* se establecen los puntos de apoyo que tendrán los cables de guarda a instalar, indicando el pórtico y las coordenadas para ambos puntos de amarre del cable de guarda; éste paso se facilitará ya que el software presenta las coordenadas de cada uno de los puntos de apoyo de los pórticos en menús desplegables como se ve en la Figura 14.

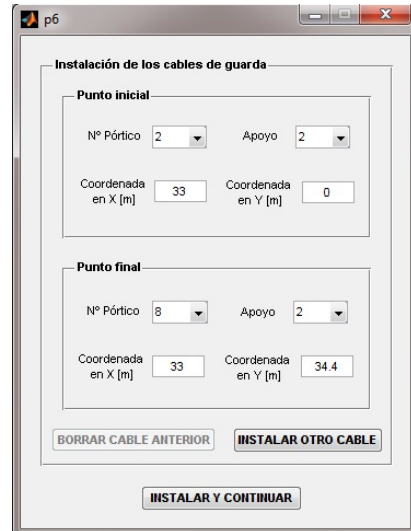


Figura 14. Instalación de los cables de guarda. [1]

Para este caso, se opta por importar el archivo de texto de los cables de guarda a instalar, una vez hecho esto, la herramienta los representa gráficamente en el dibujo 3D de modo tal que sea también una guía visual para el usuario al momento de definir su criterio de diseño, como se ve en la Figura 15.

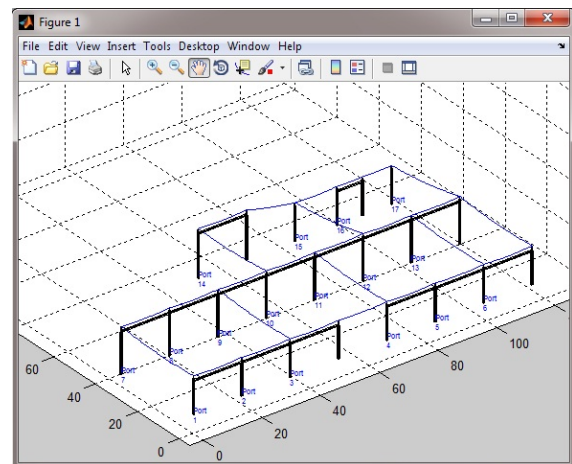


Figura 15. Dibujo 3D con los pórticos y los cables de guarda instalados. [1]

Una vez se ha terminado el ingreso de los datos del sistema de apantallamiento se abre la ventana *p7* en la cual el usuario podrá seleccionar cualquiera de las tres opciones previamente mencionadas para que la herramienta proceda a calcular los requerimientos

propios de cada opción. En este caso las alturas de los castilletes se conocían y fueron ingresadas para cada uno de los pórticos, por lo tanto la herramienta detecta que el usuario desea llevar a cabo la validación o la simulación del sistema ingresado y bloquea automáticamente la opción de diseño en la ventana **p7**.

Luego de validar cada uno de los patios de la subestación, se encontró que todos cumplen con un apantallamiento efectivo, es decir, tanto la ubicación de los cables de guarda como la altura de los castilletes donde estos se apoyan, brindan un sistema efectivo de blindaje a los elementos a proteger del patio de la subestación. Sin embargo, el mismo sistema fue ingresado a la herramienta software, exceptuando la altura de los castilletes de modo tal que se hiciera el diseño del sistema de apantallamiento y la herramienta entregara la longitud mínima de los castilletes por patio con el fin de lograr un apantallamiento efectivo.

En la Tabla 6 se muestran los resultados para las longitudes de los castilletes calculadas por la herramienta en cada patio comparado con las longitudes predefinidas del sistema actual.

**Tabla 6. Comparación entre las longitudes de los castilletes del sistema y las longitudes calculadas por la herramienta. [1]**

Tensión patio[kV]	230	115	34,5
Longitud del castillete del sistema. m	5	3,2	1,5
Longitud mínima del castillete calculada por la herramienta. m	3,1	1,1	0,52

De los resultados obtenidos para este ejemplo, se puede ver una notable reducción en las longitudes mínimas calculadas para los castilletes respecto de las longitudes definidas inicialmente. Es interesante resaltar que mientras la longitud para los castilletes del patio de 230 kV se redujo aproximadamente al 62%, las longitudes para los castilletes de los patios de 115 y 34,5 kV se redujeron prácticamente a la tercera parte (34% y 35% respectivamente), debido al hecho de que los sistemas de apantallamiento de estos patios están conectados a pórticos de un patio adyacente donde los cables de guarda se encuentran a una mayor altura, no solo debido a la longitud de los castilletes y de los pórticos de estos patios, sino además por el terracedo que presenta el terreno, el cual ubica al patio de 115 kV en un nivel 3,5 metros menor que el patio de 230 kV, y al patio de 34,5 kV en un nivel 3,5 metros menor que el patio de 115 kV. Estas características particulares favorecieron una altura de protección para los cables de guarda en los patios de 34,5 y 115 kV tal que no fue necesario incrementar la longitud mínima de los castilletes a un valor por encima de la distancia mínima de

aislamiento entre fase y tierra. Por lo tanto, la opción de apantallamiento propuesta a través de la herramienta software representa un diseño más óptimo del sistema de apantallamiento que cumple igualmente con las exigencias para brindar un blindaje efectivo a los elementos a proteger.

## 6. CONCLUSIONES

- El empleo del entorno de programación de MatLab, de uso amplio en los ambientes técnicos y universitarios, junto con el editor gráfico integrado en sus últimas versiones, ha llevado al desarrollo de una herramienta de cálculo con una interfaz gráfica para el apantallamiento de subestaciones eléctricas con interesantes posibilidades de aplicación en la docencia, como también en las aplicaciones prácticas, mediante la aplicación del método de la esfera rodante que representa la simplicidad de proteger un volumen uniforme mediante el incremento de la altura de las estructuras de soporte de los objetos de captación en lugar de proteger grupos de equipos individualmente.

- A través del método de montecarlo empleado en el módulo de simulación de la herramienta, se adelanta una aproximación del comportamiento que tendría el sistema de apantallamiento frente a las descargas atmosféricas que puedan incidir sobre una subestación eléctrica.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Autores
- [2] Torres Sánchez H., "Protección contra Rayos", Primera edición, Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá), Bogotá 2008, p. 25-80, 156-180.
- [3] Torres Sánchez H., "El Rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología" Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá), 2002, p. 67-77.
- [4] Malan, DJ and Schonland, BFJ "Progressive Lightning: Directly correlation photography and electrical studies of Lightning near from thunderstorms" Proc Royal Society (London), vol. A, 1947, p. 191, 513-523.
- [5] Kasemir, H.W., "A contribution to the electrostatic theory of lightning discharge" J. Geophysics Res. 1960, p. 65, 643, 1873-1878.
- [6] Carrillo M. A, Ríos V. E; "Apantallamiento de subestaciones: diseño". Tesis pregrado, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 1990.

[7] V.A. Rakov, "Lightning phenomenology and parameters important for lightning protection" IX International Symposium on Lightning Protection SIPDA 26th -30th November 2007- Foz do Iguaca, Brazil.

[8] Visacro, S., Soares, A. "Statistical analysis of lightning" Articles Science Vol 246, 1989. p. 457-464

[9] Shroeder, MA "Electromagnetic model for decontamination lightning currents waves" PhD thesis, federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001 (En portugués).

[10] F. de la Rosa, K. Cummins, L. Deller, G. Diendorfer, A Galvan, J. Husse, V. Larsen, C.A. Nucci, F. Rachidi, V. Rakov, H. Torres and M.A. Uman "Characterization of lightning for applications in Electric Power Systems" Journal Electra – Technical Brochure N° 172, CIGRE WG 33.01.02, December 2000.

[11] Anderson, R., Eriksson, A. "Lightning Parameters for Engineering Application" Electra N° 69, 1980, p. 65-102.

[12] Torres Sánchez H., "Norma Técnica Colombiana de protección contra rayos filosofía y resultados", Seminario internacional seguridad, riesgo, calidad y protecciones eléctricas Medellín 5, 6 y 7 de Julio de 2006".

[13] Norma Técnica Colombiana "NTC 4552 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (Rayos) Parte I: Principios Generales", Icontec 2008.

[14] Rakov, V.A. 1992. Data acquires with the LLP lightning locating systems. Meteor Hidrol N° 7:105-14.

[15] IEEE Std C62.72-2007 "Guide for the Application of surge-protective Devices for Low-Voltage (1000 V or Less) AC Power Circuits".

[16] Orozco Miranda R., "Análisis de la protección contra impactos directos de rayos y la coordinación de aislamiento en subestaciones modulares de distribución". Tesis pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005.

[17] Chowdhuri P., "Shielding Of Substations Against Direct Lightning Strokes By Shield Wires" *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 9, N° 1, Jan 94.

[18] IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations, IEEE Std 998-1996.

[19] Mousa A., "A Computer Program For Designing The Lightning Shielding Systems Of Substations" *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 6, N° 1, Jan 91.

[20] Rugeles Jones J., "Conceptos básicos en técnicas de la alta tensión", Segunda edición, Publicaciones UIS, Bucaramanga 1991, capítulo 6, p. 60.

[21] Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETI), quinta actualización, 2008, Capítulo 2, Artículo 18, p153.

[22] Martin J., "Diseño de subestaciones eléctricas" Editorial Mc Graw Hill. 1987.

[23] Diseño de la subestación Páez. Memorias de cálculo, capítulo 3. <http://www.angelfire.com/nc2/misdocumentos/subestacion/datosycalculos.html>, Diciembre 2010.

[24] Norma Técnica Colombiana "NTC 4552 Protección contra descargas eléctricas atmosféricas (Rayos) Parte III: Daños físicos a estructuras y amenazas a la vida", Icontec 2008.

## 8. CURRÍCULUMS

### **Lina Paola Salamanca Torres.**



Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E<sup>3</sup>T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia. Áreas de interés: Alta tensión y estabilidad en sistemas de potencia.

### **Yeison Jesús Torres Ardila.**



Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E<sup>3</sup>T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Bucaramanga, Colombia. Áreas de interés: Control de sistemas de potencia y alta tensión.

### **Jairo Gómez Tapias.** Ingeniero electricista UIS, Candidato a Magíster en Maestría en Ingeniería Eléctrica UIS. Investigador GISEL. Áreas de trabajo: Calidad de suministro de energía y Estabilidad en sistemas de potencia. Bucaramanga, Colombia.





**Fernando Gómez Tapias.**  
Ingeniero electricista UIS,  
Candidato a Magíster en Maestría  
en Ingeniería Eléctrica UIS.  
Investigador GISEL. Áreas de  
trabajo: Calidad de suministro de  
energía y Estabilidad en sistemas de  
potencia. Bucaramanga, Colombia.



**Hermann Raúl Vargas Torres.**  
Ingeniero Electricista UIS,  
Magíster en Potencia Eléctrica  
UIS. Doctor en Ingeniería Eléctrica  
por la UPCO Madrid, España.  
Profesor Titular UIS Investigador  
GISEL. Áreas de trabajo: Calidad  
de suministro de energía, Estabilidad en sistemas de  
potencia, Mercados de energía. Bucaramanga,  
Colombia.

## **Anexos**

## MANUAL DE USUARIO

Esta herramienta software ha sido desarrollada en MatLab con la herramienta para interfaz gráfica GUIDE, con el fin de llevar a cabo el diseño, la verificación y la simulación de sistemas de apantallamiento contra descargas atmosféricas en subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión usando cables de guarda para proteger los patios y mástiles para la protección de la caseta de control, cumpliendo para ésta última con los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 4552.

El ambiente gráfico presentado al usuario permite que éste observe en un dibujo 3D la representación gráfica de los apoyos ingresados para el apantallamiento, así como los puntos mal apantallados en caso de que así sea, con el fin de tener una ayuda visual al momento de tomar acciones correctivas en el diseño.

Como resultado final, la herramienta entrega al usuario los archivos de texto que contienen la información física y eléctrica de cada uno de los patios, así como la figura en 3D de la subestación evaluada en formato .fig (formato de gráficas en MatLab) en donde se muestran los pórticos de los patios de la subestación, los cables de guarda y los castilletes. De la misma forma, entrega los archivos de texto con la información del diseño de la caseta de control (en caso de realizarse) junto con una figura en formato .fig, de la vista de planta del techo de la caseta de control, indicando la ubicación que deberán tener los mástiles para su protección.

## REQUERIMIENTOS E INSTALACIÓN

### Requerimientos del equipo:

Para garantizar el correcto funcionamiento de la herramienta software es necesario que el equipo en el cual se va a emplear cuente con los requerimientos mínimos de hardware y software citados a continuación:

- Procesador de 1.2 MHz
- Memoria RAM 512 MB
- Disco duro: Se requieren al menos 13 MB de espacio disponible en el disco local C:\.
- MATLAB 2009 o superior
- Bloc de notas o editor de documentos en formato .txt

**NOTA:** Los requerimientos mínimos de hardware son recomendados y están encaminados a brindar un mejor desempeño de la herramienta durante su uso, debido a que la cantidad de operaciones y subrutinas que realiza el algoritmo junto con la información que se maneja en el dibujo 3D hace necesario que el equipo cuente con ciertos requerimientos mínimos para brindar un rendimiento aceptable.

### Instalación:

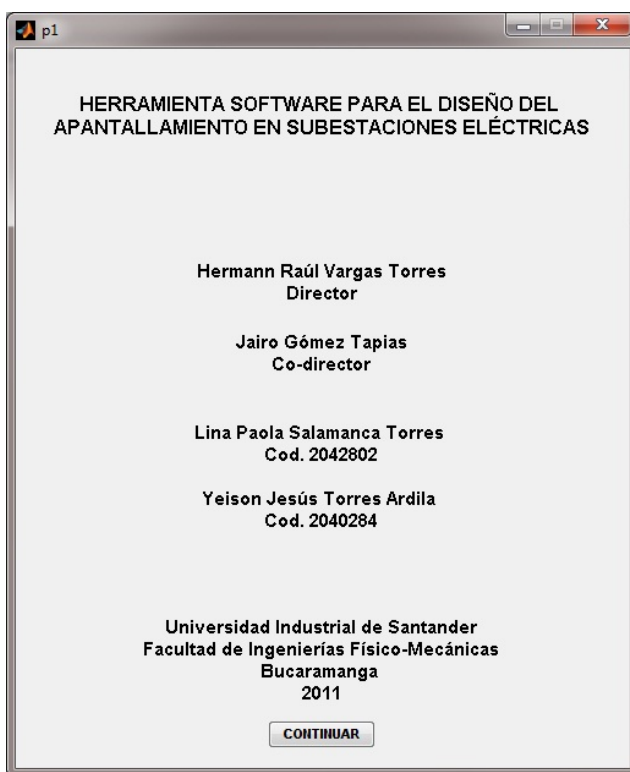
El CD-ROM contiene una carpeta llamada HSPDASE dentro de la cual se encuentran la carpeta INTERFAZ, la carpeta Proyectos\_realizados y el manual de usuario de la herramienta. El usuario debe copiar la carpeta HSPDASE en el disco duro del equipo (C:\) de modo tal que la carpeta quede con la siguiente dirección: C:\HSPDASE. La ubicación de la carpeta HSPDASE en la dirección indicada es de carácter obligatorio debido a que la herramienta tiene predefinida esta dirección para exportar los documentos de texto que contienen los resultados de los análisis que se realicen a cada proyecto, los cuales, van siendo automáticamente archivados en la carpeta Proyectos\_realizados. Por otra parte, la carpeta INTERFAZ contiene además del código, las imágenes utilizadas en las ventanas del software, por lo tanto, ninguno de los elementos de ésta carpeta anteriormente mencionados deberá ser movido, reemplazado o eliminado bajo ninguna circunstancia.

### Pasos adicionales si se desea usar el archivo ejecutable para el caso en que no se cuente con MatLab o se cuente con una versión más antigua que la requerida (opcional):

Una vez se ha llevado a cabo el procedimiento indicado en el literal “Instalación”, se procede a abrir la subcarpeta COMPILADO (ubicada dentro de la carpeta HSPDASE) la cual contiene 4 archivos. El usuario debe hacer doble click en el archivo HSPDASE\_pkg y a continuación una ventana de MS\_DOS se desplegará indicando mensajes para la instalación del compilador de MatLab, estos mensajes sugerirán la modificación de los archivos contenidos dentro de la carpeta COMPILADO y solicitarán al usuario el ingreso de una respuesta a dichas sugerencias, a lo cual el usuario deberá contestar nule, pulsando la tecla n (minúscula) y seguidamente la tecla enter para cada una de las 3 sugerencias que aparecen en dicha ventana. A continuación, comenzará la instalación del compilador de MatLab. Al finalizar la instalación del compilador, la herramienta en modo ejecutable estará lista para ser usada, para ello el usuario debe abrir la carpeta INTERFAZ (C:\HSPDASE\INTERFAZ) y hacer doble click sobre el icono del archivo HSPDASE (Archivo ejecutable), una vez hecho esto se desplegará una nueva ventana de MS\_DOS y a continuación se desplegará la ventana inicial de la herramienta a través de la cual el usuario podrá trabajar normalmente como si tuviera MatLab instalado en el equipo.

## INICIO E INGRESO DE DATOS

Para comenzar a usar la herramienta se debe iniciar MatLab y seleccionar como directorio actual de trabajo (Current Directory) la carpeta INTERFAZ ubicada en C:\HSPDASE como se explicó en el capítulo anterior, luego, se hace doble click en el icono de la carpeta INTERFAZ y a continuación aparecerán los archivos del código que conforman la herramienta software, una vez hecho esto, se escribe en el prompt (>>) de MatLab la palabra p1 (en minúscula) y se oprime la tecla Enter para desplegar la ventana *p1*; esta es la ventana de presentación que contiene la información del nombre del proyecto, el director, y los estudiantes desarrolladores del proyecto, como se muestra a continuación en la Figura 16.



*Figura 16. Ventana p1 [1]*

Es importante recordar que este proceso de selección del directorio actual de trabajo (Current Directory) debe repetirse cada vez que se inicie MatLab. Para el ingreso de los datos numéricos en todas las ventanas de la herramienta software, debe tenerse en cuenta el uso de números arábigos y el uso del punto como separador decimal, omitiendo cualquier tipo de separador de miles, decenas o centenas.

A continuación, se oprime el botón **CONTINUAR** ubicado en la parte inferior central de la ventana para dar paso a la ventana principal de la herramienta (*p2*) en la cual se muestra el nombre de la herramienta software, una fotografía de una subestación a modo de ambientación y los botones **SALIR** e **INGRESAR SISTEMA** como se aprecia en la Figura 17.



*Figura 17. Ventana p2 [1]*

Si se oprime el botón **SALIR** la herramienta se cerrará; el botón **VER RESULTADOS** está deshabilitado debido a que aún no se ha ingresado el sistema a evaluar, luego de que se lleven a cabo los cálculos de diseño, validación y/o simulación, éste botón aparecerá habilitado y permitirá seleccionar los archivos de texto que contienen el resumen de los resultados obtenidos por la herramienta dependiendo del proceso aplicado al sistema ingresado. En la sección de resultados se verá con más detalle este procedimiento.

Para continuar a la siguiente ventana se oprime el botón **INGRESAR SISTEMA** que da paso a la ventana **selección** en la cual se podrá seleccionar si desea cargar un proyecto guardado o comenzar un nuevo proyecto como se puede ver en la Figura 18, en cualquiera de los dos casos el software solicita el ingreso del nombre del proyecto, de modo tal que para el caso de la carga de un proyecto guardado se debe ingresar el nombre bajo el cual se creó dicho proyecto en su momento, y para el caso en que sea un proyecto nuevo se debe asignar un nombre diferente a los que le ha asignado a los proyectos realizados con anterioridad, dado que el software crea automáticamente una subcarpeta con ese nombre dentro de la carpeta **Proyectos\_realizados** en donde se guardan los archivos de salida que genere cada proyecto.

Se recomienda usar como nombre del proyecto el nombre de la subestación a evaluar, por ejemplo: **Itaca**, en lugar de: **Subestación Itaca**, con el fin de que el nombre asignado sea lo más corto posible y no se dificulte posteriormente cuando se desee cargar de nuevo dicho proyecto, ya que el cargador de proyectos guardados solo encontrará el proyecto si el nombre ingresado coincide exactamente con cualquiera de las subcarpetas contenidas dentro de la carpeta **Proyectos\_realizados**, discriminando nombres que varíen en espacios, mayúsculas y/o minúsculas



*Figura 18. Ventana selección [1]*

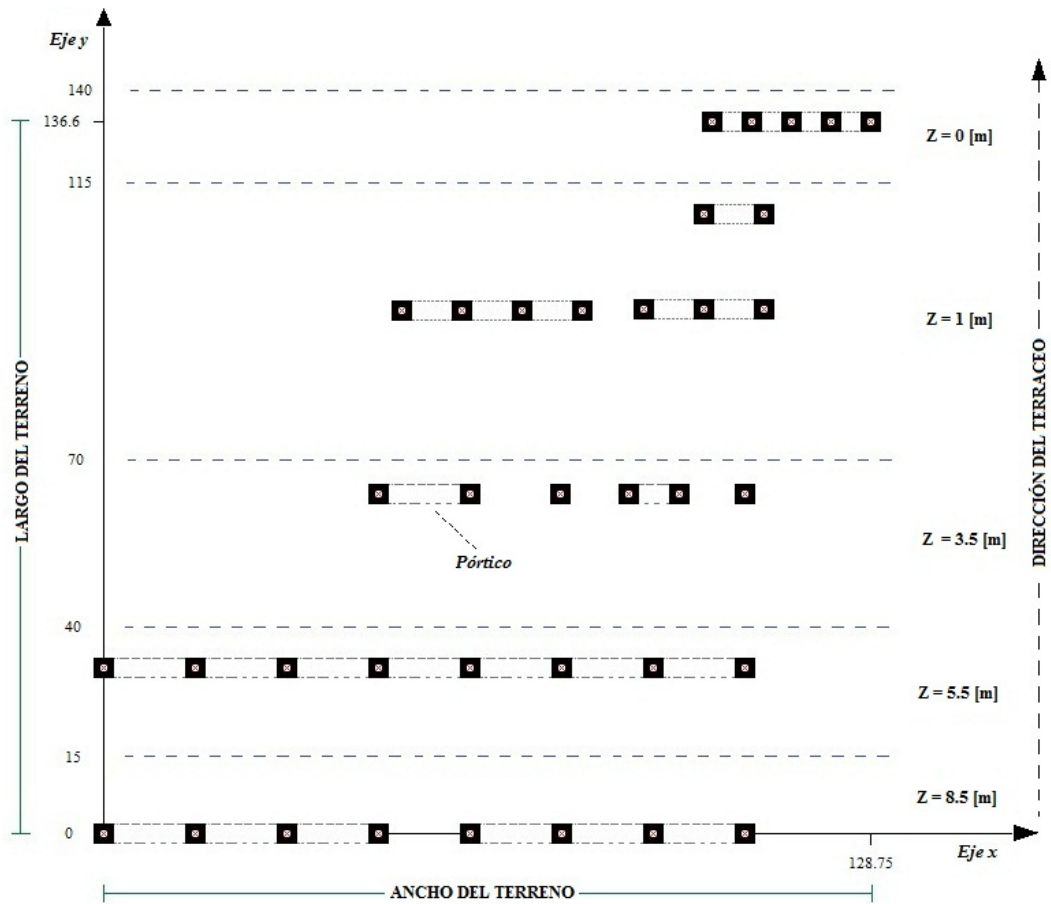
En este punto se cuentan con dos opciones que serán descritas a continuación:

### **OPCIÓN 1: CREAR UN PROYECTO NUEVO**

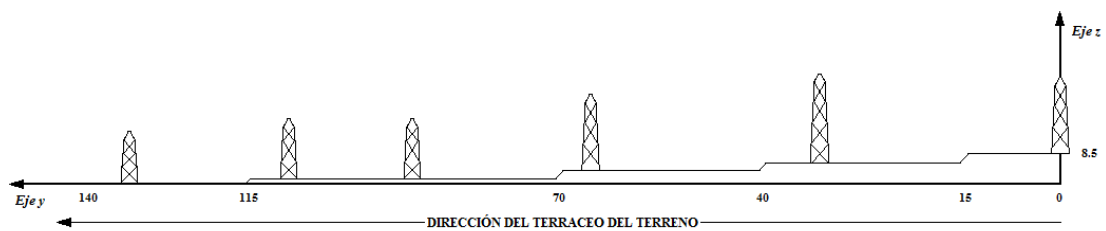
En caso de optar por la opción de crear un nuevo proyecto, se ingresa el nombre del proyecto, y se oprime el botón **Crear proyecto**, a continuación la herramienta crea automáticamente una subcarpeta con el nombre del proyecto y la guarda dentro de la carpeta INTERFAZ, igualmente despliega la ventana **p3**, en la cual se ingresan los datos correspondientes al terreno donde se ubica la subestación a apantallar tal como las dimensiones del terreno, los niveles de terraceo (en caso de que el terreno no sea completamente llano), y el número de patios de la subestación. Para el ingreso de la información solicitada en **p3** debe tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

**Ancho y Largo:** Las longitudes del ancho y del largo del terreno se ingresan para dimensionar el dibujo 3D que construye la herramienta para poder visualizar el proceso de apantallamiento, por lo tanto, estas dimensiones acotan un plano cartesiano  $x$ - $y$  que la herramienta muestra posteriormente en dicho dibujo, el cual servirá de referencia para el ingreso de las coordenadas de los pórticos y la ubicación de los cables de guarda.

El origen de coordenadas del plano mencionado y el terreno de la subestación, se ubican de tal forma que todos los pórticos y equipos de la subestación y todo su desarrollo físico quede sobre el primer cuadrante del plano cartesiano (valores positivos de  $x$  y de  $y$ ), ubicando la dirección del terraceo del terraceo paralela al eje  $y$  y como se muestra en las Figuras 19.a y 19.b. Luego se procede a trazar un rectángulo imaginario que abarque dentro de sí todos los patios de la subestación de modo tal que ningún pórtico se quede por fuera de él, una vez hecho esto se tomará la longitud en metros en el eje  $x$  y en eje  $y$  de dicho rectángulo imaginario las corresponderán al ancho y al largo del terreno respectivamente.



**Figura 19.a** Vista de planta de la ubicación de la subestación en el cuadrante positivo del plano cartesiano [1]



**Figura 19.b** Vista de perfil de la ubicación del terracedo del terreno a lo largo del eje y [1]

**Cantidad de patios de la subestación:** Es el número de patios de la subestación sobre los cuales se desea llevar a cabo un proceso de diseño, validación y/o simulación. Este valor puede ir entre 1 y 5 dado que la herramienta se ha especificado para subestaciones colombianas, las cuales cuentan con un máximo de 5 niveles de tensión. La herramienta está en capacidad de manejar la cantidad de niveles de tensión que sean necesarias, sin embargo, con el fin de cumplir con los requerimientos generales de las subestaciones colombianas se ha hecho esta restricción.

**Niveles de terraceo:** Para los terrenos donde se ubica la subestación que no sean completamente llanos sino que tengan niveles de terraceo, se deben ingresar las coordenadas que indiquen el inicio y el final de dichos niveles de terraceo indicando la altura sobre el nivel de referencia a la cual se encuentran. Se asumirá como nivel de referencia el nivel del terreno que se encuentre a menor altura respecto de los demás y deberá ser igualmente declarado dentro del total de los niveles de terraceo. Para declarar estas coordenadas, se debe ingresar el número de niveles de terraceo con los que cuente el terreno incluyendo el nivel de referencia, y oprimir a continuación el botón **Declarar coordenadas de los niveles** como se ve en la ventana *p3* (Figura 20.a), el cual desplegará la ventana *niveles* como se muestra en la Figura 20.b

**NOTA:** Para el caso en el que el terreno sea totalmente llano, el valor a ingresar en el campo **Cantidad** debe ser el valor por defecto, es decir, cero (0). Si no se ingresa un valor válido diferente de cero en este campo el botón **Declarar coordenadas de los niveles** no tendrá ninguna acción y no desplegará la ventana *niveles*.

*Figura 20.a Ventana p3 [1]*

*Figura 20.b Ventana niveles [1]*

Los niveles de terraceo del terreno se asumen que van a lo largo del desarrollo físico de la subestación teniendo en cuenta correctamente la ubicación de coordenadas como se explicó con anterioridad, el desarrollo físico de la subestación será siempre a lo largo del eje  $y$  y del plano cartesiano delimitado, de modo que conforme se avanza en el eje  $x$ , el nivel del terreno se mantiene, mientras que si se avanza a lo largo del eje  $y$  el nivel del terreno varía cada “ $y$ ” metros

En esta ventana, se debe ingresar la siguiente información teniendo en cuenta las recomendaciones correspondientes a cada una:

**Coordenada Y inicial [m]:** Corresponde a la coordenada en el eje  $y$  desde donde inicia un nivel de terraceo. Se ingresa en metros.

**Coordenada Y final [m]:** Corresponde a la coordenada en el eje  $y$  desde donde termina un nivel de terraceo. Se ingresa en metros.

**Altura sobre el nivel de referencia [m]:** Longitud en metros que se eleva el nivel de terraceo sobre el nivel de referencia. Si el nivel que se ingresa es el de referencia este valor es igual a cero. Los rangos en  $y$  y del terreno para los cuales no se especifique nivel de terraceo serán asumidos automáticamente igual a cero, por lo cual se recomienda tener en cuenta esta observación e ingresar cuidadosamente esta información ya que de ella depende la correcta ubicación en el eje  $z$  (elevación) de los pórticos, de los cables de guarda y por ende los resultados que entregue la herramienta.

**NOTA:** El usuario debe ingresar las coordenadas de todos los niveles de terraceo declarados en el campo **Cantidad** de la ventana **p3** (en caso de que el terreno no sea totalmente llano), de modo que al ingresar las coordenadas del último nivel y oprimir el botón **Siguiente**, la ventana **niveles** se cerrará y desplegará nuevamente la ventana **p3** con el campo **Cantidad** y el botón **Declarar coordenadas de los niveles** bloqueados.

En caso de que no se complete el ingreso de todas las coordenadas de los niveles de terraceo declarados en el campo **Cantidad** y se oprima el botón **Continuar** en **p3** para pasar a la ventana **p4**, el software asumirá automáticamente que todo el terreno es llano (altura de todo el terreno igual a cero).

Para el ingreso de las coordenadas de los niveles de terraceo se recomienda al usuario, si así lo desea, comenzar desde  $y=0$  e ir avanzando a lo largo del eje y hasta cubrir el largo total del terreno declarado, para tener así un orden lógico en la declaración de dichas coordenadas, teniendo en cuenta que los tramos del terreno para los cuales no declare un nivel de terraceo específico se asumirán automáticamente a cero, es decir, a la misma altura del nivel de referencia.

Cabe aclarar que en todas las ventanas de la herramienta software, los datos solicitados deben ingresarse en su totalidad (salvo el caso en el que sea opcional y en el cual se aclarará de forma pertinente cuando corresponda) ya que todos son necesarios para realizar los cálculos correspondientes al algoritmo de desarrollo, razón por la cual no será permitido avanzar en caso de que la información no sea ingresada de forma completa o de forma errónea informándosele al usuario a través de la ventana **advertencia** como se muestra en la Figura 21.



**Figura 21. Ventana advertencia [1]**

Una vez ingresada la información correspondiente al terreno de la subestación en **p3**, se oprime el botón **Continuar** para dar paso a la siguiente ventana **p4** en la cual se ingresan los datos del primer patio a apantallar, dado que la herramienta trabaja patio por patio de manera individual y consecutiva, sin embargo, la parte gráfica si permite la interacción de todos los patios ya que para el apantallamiento de un patio generalmente se cuenta con pórticos del patio anterior para el apoyo de los cables de guarda.

En este orden de ideas, con el fin de llevar a cabo un diseño óptimo, se establece la condición de ingresar primeramente los datos del patio de mayor nivel de tensión y luego, una vez terminados los cálculos correspondientes a ese patio, continuar con el siguiente patio cuyo nivel de tensión sea inmediatamente inferior y así sucesivamente hasta finalizar con el patio de menor nivel de tensión, debido a que las alturas de los castilletes de los patios de mayor nivel de tensión son mayores, al apantallar el siguiente patio (cuyo nivel de tensión es menor), los cables de guarda que por lo general inician desde los pórticos del patio anterior (mayor nivel de tensión) tendrán una mayor altura inicial y favorecerá el diseño del sistema de apantallamiento disminuyendo la longitud mínima requerida de los castilletes de los pórticos del patio que se está diseñando. La ventana **p4** se puede ver en la Figura 22.

*Figura 22. Ventana p4 [1]*

Debido a que la herramienta software lleva a cabo el procedimiento de apantallamiento patio por patio de manera individual, la ventana *p4* (Figura 22) aparece cada vez que se vaya a ingresar los datos de un patio una vez haya sido diseñado correctamente el apantallamiento del patio anterior, lo cual es indicado por el contador ubicado en la parte posterior de la ventana, el cual indica el número del patio sobre el cual se está trabajando.

La ventana de ingreso de datos del patio está dividida en 5 secciones claramente diferenciadas debido a la naturaleza de los datos que debe ser ingresada en cada una. A continuación se describe cada una de estas secciones así como los datos correspondientes a cada una de ellas explicando el significado de las siglas que les han sido asignadas.

#### **Datos eléctricos del patio**

Los datos solicitados en esta sección son:

- **Tensión:** Valor eficaz de la tensión de línea a la cual se encuentra la línea y los equipos del patio. Se ingresa en kiloVoltios [kV].
- **BIL COR:** Nivel de aislamiento contra descargas atmosféricas corregido para la altura sobre el nivel del mar a la cual se encuentra la subestación. Se ingresa en kiloVoltios [kV].
- **DMF-T:** Distancia mínima de aislamiento entre fase y tierra para el nivel de tensión del patio especificado previamente. Se ingresa en metros [m].

#### **Datos físicos del patio**

Los datos solicitados en esta sección son:

- **AEEMA:** Altura del elemento energizado más alto del patio. Dado que casi en todos los casos éste objeto corresponde a la línea de transmisión, la altura que se ingresa es la altura de la línea en el

punto de amarre en los pórticos del patio que se está evaluando. Esta altura se mide desde el nivel del piso sobre el cual se encuentran los pórticos. Este dato se ingresa en metros [m].

**NOTA:** En los casos en que se usen pórticos de otro patio para apoyar los cables de guarda que llegan al patio evaluado (Estos pórticos están a una altura mayor) se ingresará la AEEMA del patio evaluado indistintamente si ésta es menor que la de dichos pórticos de otro patio.

- **MAXFL:** Máxima flecha que presenta la línea de transmisión ubicada dentro del patio teniendo en cuenta las hipótesis de las condiciones ambientales del terreno. Se ingresa en metros [m].

#### **Información del conductor de la línea de transmisión:**

Los datos solicitados en esta sección son:

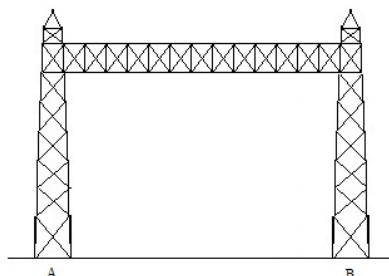
- **Conductores por fase:** Número de conductores por fase que tiene la línea de transmisión.
- **Radio del conductor:** Radio del conductor de fase de la línea de transmisión, en caso de estar en haz se ingresará el radio de uno de los conductores del haz.
- **Espaciamiento entre conductores adyacentes del haz:** Distancia entre conductores adyacentes del haz en caso de que haya más de un conductor por fase. Se ingresa en metros [m].

#### **Datos de los pórticos:**

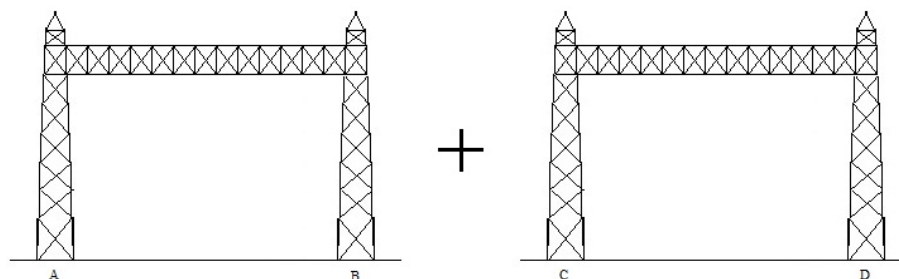
Los datos solicitados en esta sección son:

- **Cantidad de pórticos:** Número de pórticos del patio que se van a utilizar como apoyo de los cables de guarda.

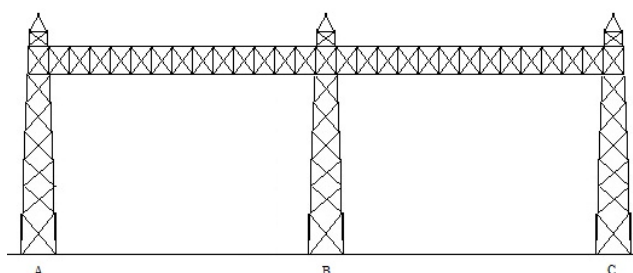
Debe tenerse en cuenta que al momento de ingresar los datos de los apoyos de los pórticos a la herramienta software, ésta siempre pedirá solo dos puntos de apoyo, lo que indica que el software solamente reconoce pórticos con dos puntos de apoyo como el presentado en la Figura 23. En la realidad se dan casos en que algunos pórticos tienen más de dos apoyos y por lo tanto pueden tener más de dos castilletes para el soporte de los cables de guarda, en estos casos deberá ingresarse la información del pórtico mediante el uso de dos o más pórticos de dos apoyos de modo tal que compartiendo puntos de apoyo en común puedan conformar pórticos más grandes. Para ilustrar mejor lo anterior, se toma como ejemplo un pórtico con 3 apoyos como se ve en la Figura 25, que deberá ser ingresado al software, teniendo en cuenta lo anterior, es decir, es necesario ingresar dos pórticos que compartan un punto de apoyo en común para conformar el equivalente del pórtico de 3 apoyos como se muestra en la Figura 25, de modo tal que los puntos de apoyo B y C en la Figura 24 se ingresen bajo las mismas coordenadas  $x-y$  con el fin de que el software la tome como el punto de apoyo B de la Figura 25. De esta forma se puede ver que en general dado un pórtico de  $k$  apoyos ( $k > 2$ ) deberán ingresarse  $k-1$  pórticos de dos apoyos para formar su equivalente en el software.



**Figura 23. Pórtico de dos apoyos [1]**



**Figura 24. Unión de dos pórticos de dos apoyos [1]**



**Figura 25. Pórtico de tres apoyos [1]**

- **LMDC:** Longitud máxima de diseño de los castilletes o apoyos de los cables de guarda. Esta información la ingresa el diseñador teniendo en cuenta la capacidad mecánica que tengan los pórticos del patio, la cual aumenta conforme el nivel de tensión es mayor dado que las estructuras de apoyo son más altas y robustas. Este dato desempeña un papel crucial en la etapa de diseño dado que el software usa este dato como limitante para calcular la longitud de los castilletes necesaria para brindar un apantallamiento efectivo, debido a que sería ilógico asumir un valor calculado por la herramienta si éste no es limitado por las restricciones reales al momento de la construcción y puesta a punto del sistema real de apantallamiento de la subestación. Empíricamente en la práctica, este valor se toma igual al 30 % de la altura del pórtico, sin embargo el usuario está en libertad de asumir un valor diferente según su propio criterio. Este dato se ingresa en metros [m]. Para el caso en el que se ingrese un sistema de apantallamiento ya diseñado para su simulación y/o validación, se podrá dejar el valor por defecto igual a tres (3) metros que tiene preestablecido el software, o colocar cero (0), lo cual no afectará en absoluto los cálculos correspondientes a este tipo de sistemas.

Una vez ingresados completamente los datos en la ventana **p4**, se cuenta con dos opciones para llevar a cabo el ingreso de los datos correspondientes a las coordenadas de los pórticos que servirán de apoyo a los cables de guarda. Las dos opciones se mencionan y se describen a continuación:

- **Opción 1:** Importar el archivo de texto que contiene la información de los pórticos
- **Opción 2:** Ingreso de las coordenadas de los pórticos de forma manual

#### **Opción 1: Importación del archivo de texto que contiene la información de los pórticos**

La primera opción consiste en ingresar dichas coordenadas mediante la importación del archivo de texto, el cual, como se explicó en el capítulo anterior, se encuentra en la carpeta INTERFAZ. Para ello se debe oprimir el botón **Importar archivo porticos.txt** luego de haberlo editado. Para editar el archivo se debe hacer doble click en su icono y a continuación se abrirá en el editor de texto de MatLab, una vez abierto el archivo, el cursor debe ubicarse una línea por debajo de las líneas de los comentarios, y se procede a escribir las coordenadas de los pórticos que servirán de apoyo a los cables de guarda siguiendo las pautas que se dan a continuación:

- El ingreso de las coordenadas se lleva a cabo asumiendo una vista de planta sobre el patio de la subestación y ubicando de esta forma los pórticos, ingresando cada uno de sus pares de apoyos en coordenadas cartesianas  $x$ - $y$  que corresponden al centro de la base de cada apoyo.
- Los datos (6 en total por línea) se ingresarán en el siguiente orden:

**x1 y1 x2 y2 z castillete**

En donde cada uno de los datos corresponde a:

**x1**: Coordenada en  $x$  del apoyo número 1 del pórtico

**y1**: Coordenada en  $y$  del apoyo número 1 del pórtico

**x2**: Coordenada en  $x$  del apoyo número 2 del pórtico

**y2**: Coordenada en  $y$  del apoyo número 2 del pórtico

**z**: Coordenada en  $z$  del pórtico (Esta altura es medida desde el nivel del terreno donde se ubique el pórtico, el nivel de terrazo lo tiene automáticamente en cuenta la herramienta y por lo tanto, no deberá ser tenido en cuenta en este paso ni en ningún otro).

**castillete**: El ingreso de este dato es opcional dependiendo de la información que se tenga al respecto; para el caso en que se trate de un sistema que ya ha sido diseñado con otra herramienta o cálculos este dato es conocido y por lo tanto debe ser ingresado, sin embargo, para el diseño del sistema de apantallamiento, pueden presentarse dos casos que se mencionan a continuación:

**Caso 1. La longitud de los castilletes es desconocida:** Ocurre cuando se ubican las coordenadas de un pórtico del patio y este pórtico no ha intervenido en el diseño del apantallamiento de otro patio diseñado previamente.

**Caso 2. La longitud de los castilletes es conocida:** Ocurre cuando se ubican las coordenadas de un pórtico del patio y este pórtico ha intervenido en el diseño del apantallamiento de otro patio diseñado previamente (pertenece a un patio cuyo sistema de apantallamiento ha sido previamente diseñado y desde donde los cables de guarda parten hacia el patio que se está diseñando).

Para estos dos casos se debe ingresar el valor por defecto: cero (0), que ha sido preestablecido para este campo. Este valor permitirá a la herramienta identificar que la longitud de los castilletes puede ser desconocida (Caso 1) o puede ser conocida para algunos de los pórticos del patio (Caso 2), y automáticamente la herramienta asigna de forma interna la longitud de los castilletes para cada uno de los pórticos según corresponda, sin embargo, en los archivos de texto de salida que crea la herramienta y que contienen la información de los pórticos aparecerá este valor igual a cero para cualquiera de estos dos casos.

- Cada reglón o línea del documento contendrá las coordenadas de un solo pórtico, por lo tanto habrán tantas líneas como pórticos se deseen instalar.
- Cada dato deberá separarse por medio de un espacio.
- Si el dato es decimal, se usará el punto en lugar de la coma.
- Los datos se ingresan en metros.

A continuación se muestra a modo de ejemplo el ingreso de los pórticos de un patio con configuración doble barra y la numeración que se recomienda realizar por aparte de cada uno de los pórticos que sean ingresados al software.

La vista de planta del patio se muestra en la Figura 27 e ilustra en color rojo la ubicación de los pórticos que se usarán para el soporte de los cables de guarda; sin embargo como puede notarse, hay 4 pórticos con dos apoyos y 3 pórticos con 3 apoyos ( $k=3$ ), lo cual indica que en el campo **Cantidad de pórticos** de la ventana **p4** debió ingresarse un total de:

$k$  = Número de apoyos de los pórticos

$n$  = Número de pórticos con tres apoyos

$n*(k-1)$  = número de pórticos de dos apoyos

$$3*(3-1) = 6$$

más 4 pórticos de dos apoyos presentes en el patio:

$$6 + 4 = 10 \text{ pórticos de dos apoyos}$$

Cabe recordar la recomendación hecha anteriormente en cuanto a que estos 10 pórticos (de dos apoyos cada uno) sean enumerados en los planos del usuario para facilitar más adelante la ubicación de los cables de guarda, esta numeración se puede realizar en cualquier orden ya que lo realmente importante es tener una idea de su ubicación en el plano.

Teniendo en cuenta las coordenadas mostradas en la Figura 27 , y asumiendo que se está diseñando el sistema de apantallamiento y la altura de los pórticos es de 15 metros, el ingreso del pórtico número uno (primera línea) deberá hacerse como sigue:

30 10 40 10 15 0

Y las coordenadas del pórtico número dos (segunda línea) serán:

40 10 50 10 15 0

Una vez terminado el ingreso de los datos, se guardan los cambios en el archivo y se oprime el botón **IMPORTAR ARCHIVO CABLES.TXT**, el software cerrará la ventana **p4** y abrirá una figura en 3D que incluye los pórticos y los cables de guarda que encierran el perímetro de los pórticos teniendo en cuenta la información en cuanto a las dimensiones y a los niveles de terracedo ingresadas en la ventana **p3**. Debe tenerse especial cuidado con este dibujo ya que **POR NINGÚN MOTIVO DEBERÁ CERRARSE** durante el uso del software para una misma subestación, ya que ésta es la ayuda visual y es donde se muestra toda la información de los cables de guarda instalados y los puntos vulnerables del sistema, en caso de que el usuario lo cierre accidentalmente deberá dirigirse inmediatamente (sin llevar a cabo ninguna acción adicional con el software) a la carpeta INTERFAZ y hacer doble click sobre el icono Dibujo3D.fig, el cual contiene la figura con los últimos cambios realizados con la herramienta; simultáneo a esto, el software muestra al usuario la ventana de información como se puede ver en la Figura 28, en la cuál se especifican los datos calculados con la información de entrada. (Continuar la lectura del documento a partir de la Figura 28 en caso de que no se desee optar por la Opción 2).

## Opción 2: Ingreso de las coordenadas de los pórticos de forma manual

La segunda opción consiste en ingresar las coordenadas de los pórticos manualmente a través de la interfaz gráfica, para ello se oprime el botón **Ubicar pórticos** el cuál desplegará la ventana **p5** con el fin de ingresar las coordenadas en el plano  $x$ - $y$  de los apoyos de los pórticos (cuyas dimensiones fueron establecidas mediante los campos **Ancho** y **Largo** en la ventana **p3**) teniendo en cuenta lo explicado previamente referente a los pórticos con más de dos apoyos. La ventana **p5** para el ingreso de las coordenadas de los apoyos de cada pórtico se muestra en la Figura 26.

The screenshot shows a software window titled 'p5'. At the top, there is a label 'INGRESANDO DATOS CORRESPONDIENTES AL PÓRTICO NÚMERO:' followed by a text input field. Below this is a section titled 'Información del pórtico'. Inside this section, there is a blue note: 'NOTA: Estos datos se ingresan en coordenadas cartesianas sobre un plano imaginario'. This section is divided into two columns: 'APOYO 1' and 'APOYO 2'. Each column contains two input fields: 'Coordenada X [m]:' and 'Coordenada Y [m]:'. Below these columns is a single input field for 'Altura del pórtico [m]:'. Below the 'Información del pórtico' section is another section titled 'Información de los castilletes'. It contains a red note: 'NOTA: Solamente se introduce este dato en caso de conocerse, en caso contrario se debe dejar el valor por defecto (0)'. Below the note is an input field for 'Longitud de los castilletes del pórtico [m]:' with the value '0' entered. At the bottom of the window are two buttons: 'ATRÁS' on the left and 'CONTINUAR' on the right.

Figura 26. Ventana p5 [1]

Un indicador ubicado en la parte superior de la ventana mostrará el número del pórtico cuyas coordenadas están siendo ingresadas. Es muy importante tener en cuenta esta numeración de los pórticos en los planos con los cuales se apoya el usuario para su diseño, y se recomienda enumerarlos en sus planos físicos (cada pórtico de dos apoyos) con el fin de facilitar la labor posterior de la ubicación de los cables de guarda.

La ventana **p5** está dividida en 2 secciones claramente diferenciadas. A continuación se describe cada una de estas secciones así como los datos correspondientes a cada una de ellas.

### Información del pórtico:

El ingreso de las coordenadas se lleva a cabo asumiendo una vista de planta sobre el patio de la subestación, y ubicando de esta forma los pórticos, ingresando cada uno de sus pares de apoyos en coordenadas cartesianas  $x$ - $y$  que corresponden al centro de la base de cada apoyo.

A continuación se muestra a modo de ejemplo el ingreso de los pórticos de un patio con configuración doble barra y la numeración que debe realizarse por aparte para cada uno de los pórticos que sean ingresados al software.

La vista de planta del patio se muestra en la Figura 27 e ilustra en color rojo la ubicación de los pórticos que se usarán para el soporte de los cables de guarda; sin embargo como puede notarse, hay 4 pórticos con dos apoyos y 3 pórticos con 3 apoyos ( $k=3$ ), lo cual indica que en el campo **Cantidad de pórticos** de la ventana **p4** debió ingresarse un total de:

$k$  = Número de apoyos de los pórticos  
 $n$  = Número de pórticos con tres apoyos

$$n*(k-1) = \text{número de pórticos de dos apoyos}$$

$$3*(3-1) = 6$$

más 4 pórticos de dos apoyos presentes en el patio:

$$6 + 4 = 10 \text{ pórticos de dos apoyos}$$

Cabe recordar la recomendación hecha anteriormente en cuanto a que estos 10 pórticos (de dos apoyos cada uno) sean enumerados en los planos físicos del usuario para facilitar más adelante la ubicación de los cables de guarda, esta numeración se puede realizar en cualquier orden ya que lo realmente importante es tener una idea de su ubicación en el plano.

Teniendo en cuenta las coordenadas mostradas en la Figura 27, el ingreso del pórtico número 1 deberá hacerse como sigue:

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
30	10	40	10

Y las coordenadas del pórtico número dos serán:

$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
40	10	50	10

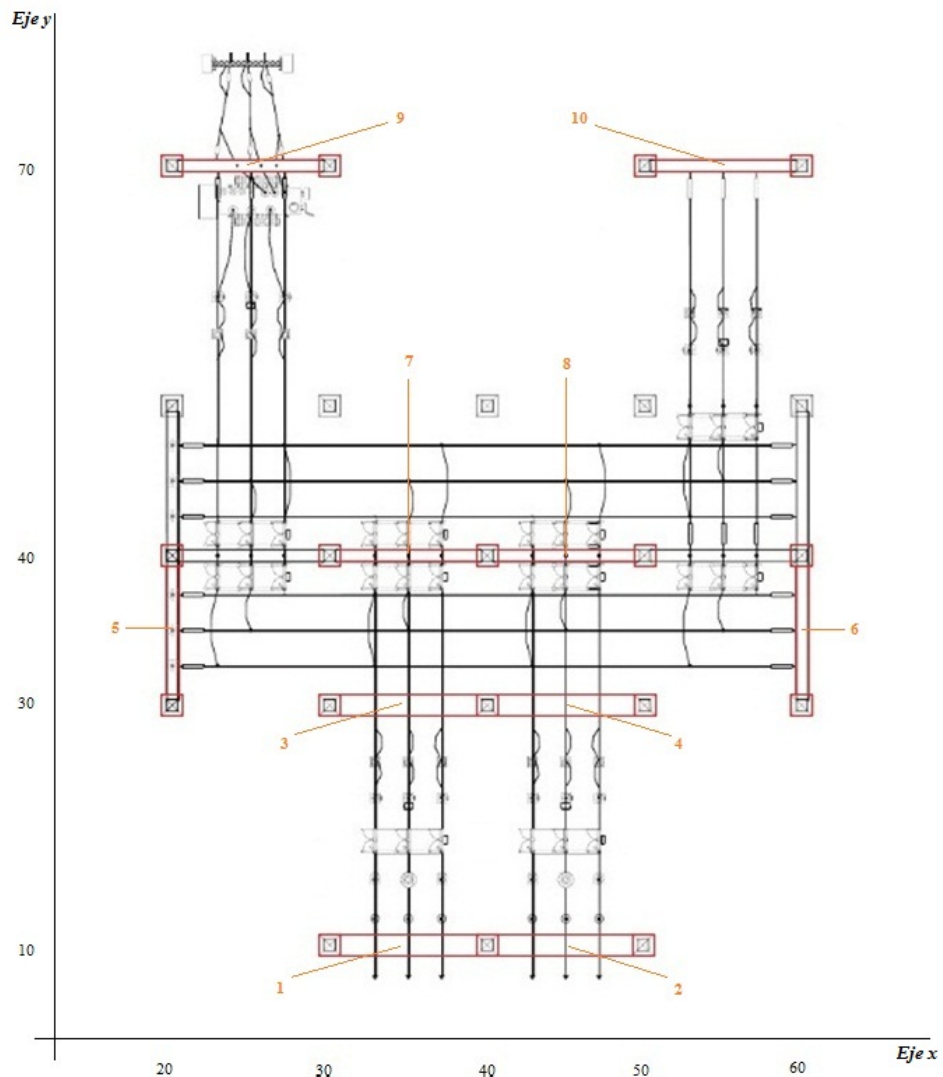


Figura 27. Vista de planta de un patio de la subestación. [1]

#### Información de los castilletes:

- Longitud de los castilletes del pórtico:** El ingreso de este dato es opcional dependiendo de la información que se tenga al respecto; para el caso en que se trate de un sistema ya diseñado este dato es conocido y deberá ingresarlo antes de oprimir el botón **Continuar** para ingresar las coordenadas del siguiente pórtico, sin embargo si se trata del diseño del sistema de apantallamiento, pueden presentarse dos casos que se mencionan a continuación:

**Opción 1. La longitud de los castilletes es desconocida:** Ocurre cuando se ubican las coordenadas de un pórtico del patio y este pórtico no ha intervenido en el diseño del apantallamiento de otro patio diseñado previamente, en este caso se debe dejar el valor por defecto igual a cero (0) que ha sido preestablecido para este campo, este valor cero indicará que esa altura es desconocida y requiere calcularse.

**Opción 2. La longitud de los castilletes es conocida:** Ocurre cuando se ubican las coordenadas de un p3rtico del patio y este p3rtico ha intervenido en el diseo del apantallamiento de otro patio diseado previamente (pertenece a un patio cuyo sistema de apantallamiento ha sido previamente diseado y desde donde los cables de guarda parten hacia el patio que se est diseando), en este caso, el software detecta automticamente los p3rticos en cuesti3n y adjudica automticamente de forma interna la longitud del castillete que ha sido calculado con anterioridad para ese p3rtico en ese patio.

De esta forma con dos p3rticos de dos apoyos cada uno se ingresa al software el equivalente a un p3rtico con tres apoyos comprobando lo explicado anteriormente. Siguiendo el mismo procedimiento, se ingresan las coordenadas del los dem3s p3rticos hasta llegar al 3ltimo, una vez dadas las coordenadas de este 3ltimo p3rtico, al oprimir el bot3n **Continuar** el software cerrar3 la ventana y abrir3 una figura en 3D que incluye los p3rticos y los cables de guarda que encierran el per3metro de los p3rticos teniendo en cuenta la informaci3n en cuanto a las dimensiones y a los niveles de terraceo ingresadas en la ventana p3.

Debe tenerse especial cuidado con este dibujo ya que **POR NING3N MOTIVO DEBER3 CERRARSE** durante el uso del software para una misma subestaci3n, ya que est3 es la ayuda visual y es donde se muestra al usuario toda la informaci3n de los cables de guarda instalados y los puntos vulnerables del sistema; simult3neo a esto, el software muestra al usuario la ventana de informaci3n como se puede ver en la Figura 28, en la cu3l se especifican los siguientes valores:

*Figura 28. Ventana info [1]*

**Informaci3n el3ctrica del patio:**

- **Impedancia caracter3stica:** Valor en Ohmios de la impedancia de la l3nea de transmisi3n ubicada a mayor altura dentro del patio.
- **CFO:** Valor en Kilovoltios de la tensi3n cr3tica de flameo inverso teniendo en cuenta el nivel de tensi3n del patio.
- **Corriente cr3tica Is:** Valor en kA de la corriente de protecci3n a partir de la cual los equipos de la subestaci3n est3n protegidos, todas las descargas atmosf3ricas cuya corriente de retorno sea menor o igual a este valor de corriente podr3n penetrar el apantallamiento.
- **Radio de la esfera:** Longitud en metros que representa la distancia cr3tica de la descarga atmosf3rica (representada por medio de la esfera) para la cual todo objeto situado a una distancia al centro de la esfera igual o menor que est3 distancia (radio de la esfera) est3 expuesto a sufrir una descarga atmosf3rica.

### Información para el apantallamiento:

- **Cables de guarda recomendados a instalar:** Cantidad de cables de guarda que la herramienta software recomienda instalar a lo largo de la línea de transmisión teniendo en cuenta la distancia entre castilletes de pórticos diferentes ubicados consecutivamente, como se muestra en la Figura 29.

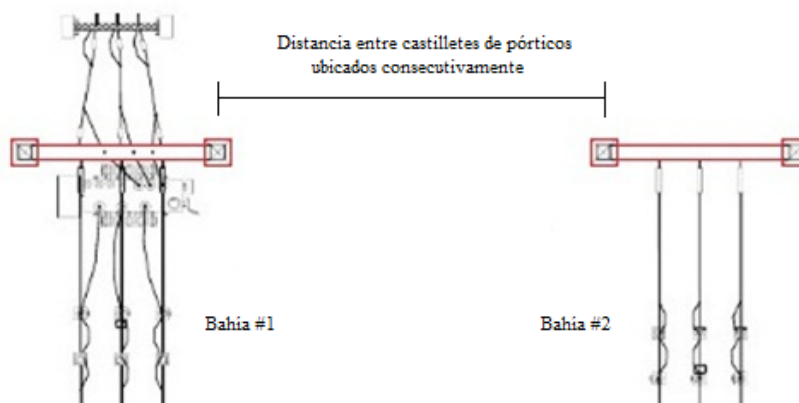


Figura 29. Vista de planta de dos bahías con pórticos consecutivos [1]

- **Separación recomendada:** Distancia en metros recomendada para la separación entre cables de guarda adyacentes que la herramienta software calcula teniendo en cuenta la longitud inicial de los castilletes (igual a la distancia de aislamiento entre fase y tierra) y el radio de la esfera, de modo tal que la altura del punto más bajo que alcance la esfera sea igual a la altura de amarre de la línea de transmisión en el pórtico, como se puede ver en la Figura 30.

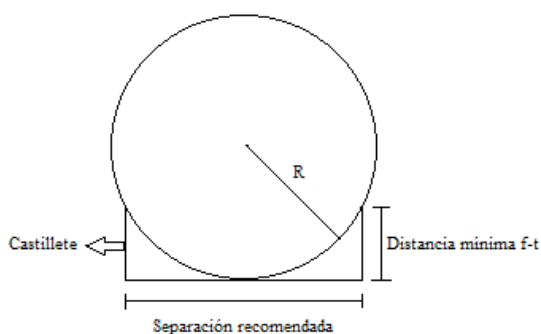
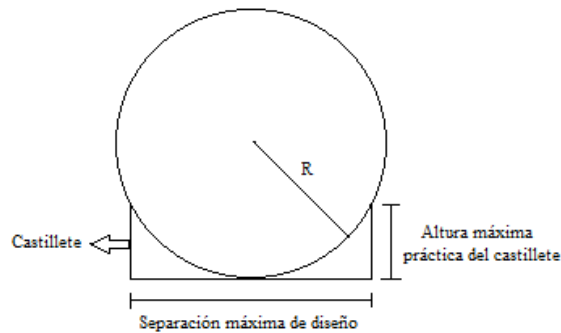


Figura 30. Esquema gráfico de la separación recomendada [1]

- **Separación máxima de diseño:** Distancia máxima en metros para la separación entre cables de guarda adyacentes que la herramienta software calcula teniendo en cuenta la longitud máxima práctica de los castilletes y el radio de la esfera, de modo tal que la altura del punto más bajo que alcance la esfera sea igual a la altura de amarre de la línea de transmisión en el pórtico (altura del pórtico), como se puede ver en la Figura 31.



**Figura 31. Esquema gráfico de la separación máxima de diseño [1]**

El usuario está en libertad de tomar en cuenta las recomendaciones del software, o bien, tomar sus propias decisiones basadas en la experiencia y asumir una distancia entre cables de guarda adyacentes que considere adecuada bajo su criterio, sin embargo cabe recordar que las recomendaciones dadas en la ventana *info* (Figura 28) son basadas en cálculos exactos para evitar demoras en el diseño debido a la acción de recalcular los resultados que debe llevar a cabo la herramienta para encontrar la altura de los castilletes que brinde un apantallamiento efectivo. Una vez analizado el dibujo 3D y la ventana *info*, se debe ingresar la ubicación de los cables de guarda, para ello, se cuenta con dos opciones similares a las presentadas en la ventana *p4*, las cuales se mencionan y se describen a continuación:

Opción 1: Importación del archivo de texto que contiene la información de los cables de guarda a instalar.

Opción 2: Ingreso de las coordenadas de los cables de guarda de forma manual.

**Opción 1: Importación del archivo de texto que contiene la información de los cables de guarda a instalar.**

Mediante esta opción se ingresan las coordenadas de los puntos de amarre de los cables de guarda a instalar mediante la importación del archivo de texto ubicado en la carpeta INTERFAZ. Para ello debe oprimir el botón **Importar archivo cables.txt** luego de haber editado el archivo. Para editar el archivo se debe hacer doble click en su icono y a continuación se abrirá en el editor de texto de MatLab, una vez abierto el archivo, el cursor se debe ubicar una línea por debajo de las líneas de los comentarios, y se procede a escribir las coordenadas de los dos puntos de amarre de los cables de guarda siguiendo las pautas que se dan a continuación:

- Cada cable de guarda a instalar tendrá dos puntos de amarre: punto de amarre 1 y punto de amarre 2 los cuales corresponden cada uno a un pórtico y a uno de sus apoyos (apoyo1 o apoyo2), ambos datos seleccionados por el usuario.
- El ingreso de las coordenadas se lleva a cabo asumiendo una vista de planta sobre el patio de la subestación y teniendo en cuenta las coordenadas de los pórticos ingresadas previamente.
- El dibujo 3D contiene junto a uno de los apoyos de cada pórtico (de dos apoyos) una numeración conforme al orden de ingreso de sus datos (al importar el archivo apoyos.txt o ingresar las coordenadas de los apoyos de forma manual), el cual servirá de indicador y ayuda visual en este proceso.
- Los datos (4 en total por línea) se ingresarán en el siguiente orden:

**Portico\_amarre\_1 Apoyo\_amarre\_1 Portico\_amarre\_2 Apoyo\_amarre\_2**

En donde cada uno de los datos corresponde a:

**Portico\_amarre\_1:** Número del pórtico del punto de amarre 1

**Apoyo\_amarre\_1:** Número del apoyo (1 o 2) del pórtico del punto de amarre 1

**Portico\_amarre\_2:** Número del pórtico del punto de amarre 2

**Apoyo\_amarre\_2:** Número del apoyo (1 o 2) del pórtico del punto de amarre 2

Una vez instalados los cables de guarda en su totalidad, se despliega la ventana **p7** como se ve en la Figura 34, en la cual se presenta un menú de opciones mediante el cual se podrá tener acceso a los 3 módulos de la herramienta software (Diseño, validación y simulación) y a la opción de **SALIR** en caso de que quiera abortar el proyecto actual. (Continuar con la lectura del archivo a partir la Figura 34 en caso de no optarse por la Opción 2).

### Opción 2: Ingreso de las coordenadas de los cables de guarda de forma manual

Para ingresar las coordenadas de los puntos de amarre de los cables de guarda de forma manual, se debe oprimir el botón **INSTALAR CABLES DE GUARDA MANUALMENTE** de la ventana **info** e inmediatamente aparecerá la ventana **p6** (Figura 32). En esta ventana se presentan dos secciones denominadas punto inicial y punto final que representan los dos puntos de amarre del cable de guarda. Cada una de estas secciones tiene 4 ítems que serán descritos a continuación:



*Figura 32. Ventana p6 [1]*

- **Pórtico:** Es el número que le corresponde al pórtico (según la numeración recomendada en el ejemplo previo cuando se ingresaron las coordenadas de los pórticos, ver Figura 27) desde el cual se piensa conectar uno de los extremos del cable de guarda a instalar.

- **Apoyo:** Es el número del apoyo del pórtico el cual puede ser 1 o 2 correspondiendo cada uno a las coordenadas de la pareja de apoyos que describe cada pórtico ingresado al software. (Recordar que los pórticos que se ingresan al software son de dos apoyos previamente ingresados en la ventana de ingreso de coordenadas de los pórticos, es decir, en la ventana **p5**. Ver Figura 26).
- **Coordenada en X:** Coordenada en X correspondiente al apoyo del pórtico seleccionado. Este dato se ingresa en metros.
- **Coordenada en Y:** Coordenada en Y correspondiente al apoyo del pórtico seleccionado. Este dato se ingresa en metros.

El dibujo 3D contiene junto a uno de los apoyos de cada pórtico (de dos apoyos) una numeración conforme al orden de ingreso de sus datos (al importar el archivo apoyos.txt o ingresar las coordenadas de los apoyos de forma manual), el cual servirá de indicador y ayuda visual en este proceso.

Dependiendo del criterio del usuario, se debe decidir si se desea instalar cables de guarda adicionales a los que el software instala encerrando el perímetro de los pórticos (los cuales pueden verse en el dibujo 3D) o no instalar más cables. Dependiendo del caso deberá procederse como sigue:

**Caso 1. No instalar más cables de guarda adicionales:** Se deberán dejar los campos tal cual como aparecieron y se oprime el botón **INSTALAR Y CONTINUAR**, a continuación aparecerá una ventana de advertencia (Figura 33) en la cual se advierte acerca de la falta de ingreso de información en la ventana y se le indica que tome una decisión si continúa o no, para este caso se deberá oprimir el botón **SI**.



*Figura 33. Ventana advertencia2 [1]*

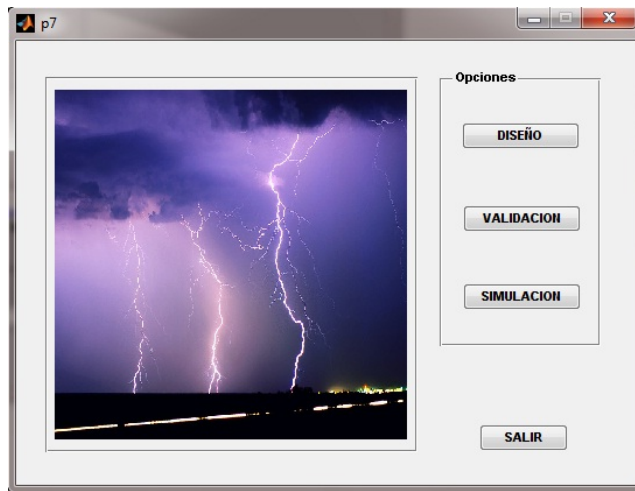
**Caso 2. Instalar uno o varios cables de guarda:** En este caso se ingresa la información correspondiente a los puntos inicial y final del primer cable de guarda a instalar, teniendo en cuenta las coordenadas de cada punto y verificando su ubicación espacial en el dibujo 3D. Una vez ingresada la información completa, se oprime el botón **CONTINUAR** en caso de que sea un solo cable o se oprime el botón **INSTALAR OTRO CABLE** en caso de querer instalar el siguiente. Esta rutina debe ser repetida conforme se desee instalar cierta cantidad de cables de guarda, hasta llegar al último cable de guarda en donde ahora en lugar de oprimir el botón **INSTALAR OTRO CABLE DE GUARDA** se debe oprimir el botón **CONTINUAR**.

En caso tal de que se cometa un error al ingresar un cable de guarda, éste podrá ser borrado haciendo click en el botón **BORRAR CABLE ANTERIOR** el cual le permite deshacer el cable instalado inmediatamente anterior, por lo cual se recomienda verificar simultáneamente la parte gráfica (dibujo 3D) junto con los datos de cada cable de guarda que se instala.

**Posibles errores del usuario**

En caso de que por error el usuario oprima el botón **CONTINUAR** cuando no se debe, aparecerá la ventana **advertencia2** (Ver Figura 33), en donde deberá oprimir la opción **NO** para regresar a la ventana de instalación de cables de guarda y continuar instalando más cables, por otra parte puede darse también el error en que luego de ingresar los campos para el último cable de guarda a instalar, se presione el botón **INSTALAR OTRO CABLE** (lo cual es erróneo) y ocasione que aparezcan de nuevo los campos en blanco listos para otro cable más sin que haya necesidad de instalar más cables, en este caso se debe presionar el botón **CONTINUAR** y a continuación el botón **SI** en la ventana **advertencia2**.

Una vez instalados los cables de guarda en su totalidad, se despliega la ventana **p7** como se ve en la Figura 34, en la cual se presenta un menú de opciones mediante el cual el usuario podrá tener acceso a los 3 módulos de la herramienta software (Diseño, validación y simulación) y a la opción de **SALIR** en caso de que quiera abortar el proyecto actual.



**Figura 34. Ventana p7 [1]**

Al momento de aparecer la ventana de menú de opciones algunas de las opciones estarán bloqueadas dependiendo de la información que se haya ingresado inicialmente en la ventana **p6** (Figura 32) o en el archivo de texto en caso de haber optado por la opción de importar el archivo que contiene la información de los cables de guarda a instalar, de modo tal que si no fue ingresada la información de la altura de los castilletes para todos los pórticos, aparecerá habilitada únicamente la opción de diseño ya que indica que existen pórticos cuya altura del castillete requiere ser calculada, en caso contrario, en el que si se ingresó la altura de los castilletes de TODOS los pórticos (Se supone que se ingresó un sistema de apantallamiento ya diseñado en este caso) aparecerán habilitadas únicamente las opciones de validación y simulación. Es importante mencionar que al momento de los cálculos la herramienta software asume los siguientes aspectos en cuanto a la aplicabilidad de las opciones presentes en la ventana de menú de opciones (**p7**) dependiendo de cada sistema tal como se detalla en la Tabla 7:

SISTEMA	DISEÑO	VALIDACIÓN	SIMULACIÓN
NUEVO	A	NA	A*
EXISTENTE	NA	A	A

**Tabla 7. Aplicabilidad de la herramienta software para sistemas de apantallamiento nuevos y existentes.**  
 (A = Aplica, NA = No Aplica). \*Aplica siempre y cuando se lleve a cabo para cada patio una vez se ha diseñado su respectivo apantallamiento. [1]

## OPCIÓN 2: CARGAR UN PROYECTO GUARDADO

Si se opta por la opción de cargar un proyecto guardado, lo cual solo es posible cuando el sistema de apantallamiento del proyecto ha sido anteriormente ingresado y evaluado. En este caso, se ingresa el nombre del proyecto y se oprime el botón **Cargar proyecto**, a continuación la herramienta cargará automáticamente los siguientes archivos de texto que tendrán que estar dentro de la subcarpeta del proyecto (ya que el software previamente los creó y guardó en esa ubicación):

- Informacion\_del\_terreno.txt
- Datos\_electricos\_del\_patio\_de\_XXX\_kV.txt
- Porticos\_del\_patio\_de\_XXX\_kV.txt
- Cables\_a\_instalar\_en\_patio\_de\_XXX\_kV.txt

Los tres últimos archivos se crean para cada patio ingresado, y XXX representa la tensión de dicho patio. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante recordar que estos archivos no deben ser eliminados bajo ningún motivo, dado que son los archivos que contienen la información física y eléctrica de la subestación que el software requiere al momento de cargar el proyecto y en caso de no existir se mostrará una ventana de error.

**NOTA: Si se desea modificar los archivos de texto, deben ser modificados única y exclusivamente los valores numéricos, manteniendo el formato que tiene cada archivo, el cual se explica en los comentarios que cada uno contiene. Por ningún motivo estos comentarios deberán ser modificados, alterados o eliminados ni total ni parcialmente ya que puede correr el riesgo que los archivos presenten errores al cargarse luego de dichas modificaciones.**

Si los archivos del proyecto guardado son verificados exitosamente, la herramienta procede a cargar la información del patio de mayor nivel de tensión de la subestación conforme a los datos ingresados. A continuación la herramienta muestra la Figura 3D donde se encuentran los pórticos del patio y los cables de guarda del encerramiento del patio y los instalados por el usuario, además despliega la ventana **p7** (Figura 34) que corresponde al menú de opciones de la herramienta.

En la ventana **p7** se selecciona el proceso que desee llevar a cabo, y como se explicó anteriormente, dependiendo de la información contenida en el archivo de texto que contiene la información de los pórticos para cada patio, podrán estar habilitadas las opciones de diseño, validación y/o simulación. Una vez se ha llevado a cabo cualquiera de estos tres procesos, la herramienta muestra un mensaje para que se continúe con el proceso que se está llevando a cabo.

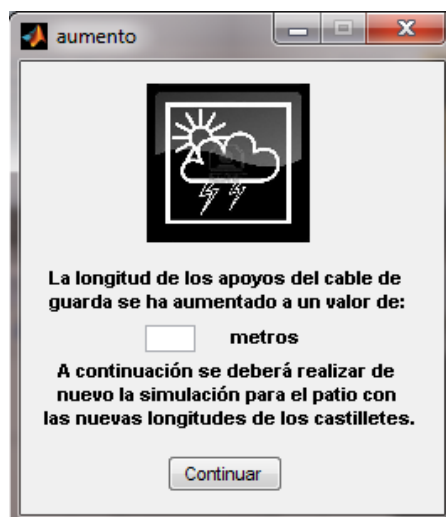
A continuación se hace un énfasis más profundo de cada uno de los módulos de la herramienta software, en donde podrán verse entre otras cosas las ventanas que muestra la herramienta para cada módulo dependiendo de los resultados obtenidos.

## MÓDULO DE DISEÑO

Al oprimir el botón **DISEÑO**, la herramienta software simula la esfera rodante a lo largo y ancho de la zona de protección, demarcada por los pórticos utilizados para apoyar los cables de guarda que se encuentran ubicados en el perímetro del patio y encuentra los puntos de contacto entre el sistema de apantallamiento y la esfera. Teniendo en cuenta estos puntos, el software calcula la longitud de los castilletes que sirven como apoyo de los cables de guarda y que se ubican sobre los pórticos de modo tal que ofrezcan un apantallamiento efectivo a los equipos del patio.

El software asume inicialmente la distancia de los castilletes igual a la distancia mínima de aislamiento entre fase y tierra del patio y lleva a cabo la simulación de la esfera para verificar si esa distancia la cual dependiendo de la ubicación que se le dé a los cables de guarda recomendados por la ventana **info** permite un apantallamiento efectivo o no, en caso de no ser suficiente, el software calcula una longitud de aumento que se agrega a la longitud inicial del castillete teniendo como límite superior la longitud máxima de diseño del castillete ingresado para cada patio en el campo **LMDC** de la ventana **p4** con el fin de satisfacer la condición para un apantallamiento efectivo.

Si al aumentar la longitud de los castilletes hasta un valor menor o igual a dicha longitud máxima se logra un apantallamiento efectivo, se indicará dicha longitud a la cual se aumentarán los castilletes a través de la ventana **aumento** como se ve en la Figura 35.

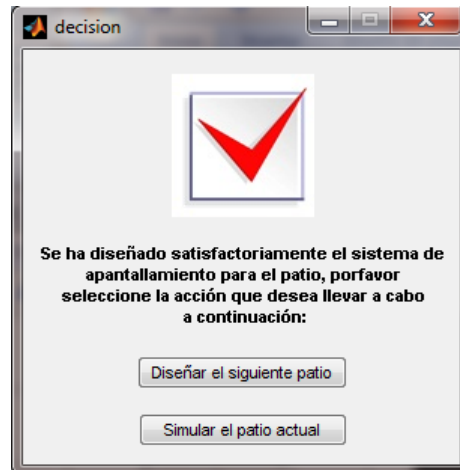


*Figura 35. Ventana aumento [1]*

Además se informará que es necesario realizar de nuevo los cálculos para la nueva longitud calculada (es posible que este proceso se repita más de una vez), para lo cual se deberá oprimir el botón **Continuar**, la herramienta corrige gráficamente esta longitud en el dibujo 3D y a continuación despliega de nuevo la ventana **p7** en la cual se debe oprimir nuevamente el botón **DISEÑO** para que la herramienta realice de nuevo los cálculos y muestre la notificación de que se ha logrado un diseño óptimo a través de la ventana **decision** como se puede ver en la Figura 36.

En este punto se podrá escoger entre dos opciones, las cuales permitirán continuar y diseñar el apantallamiento del siguiente patio o llevar a cabo la simulación de las descargas atmosféricas en el patio que se acabó de apantallar, y acto seguido continuar con el diseño del apantallamiento del siguiente patio; en este orden de ideas, si se escoge la primera opción, se debe oprimir el botón **Diseñar el siguiente patio** y si escoge

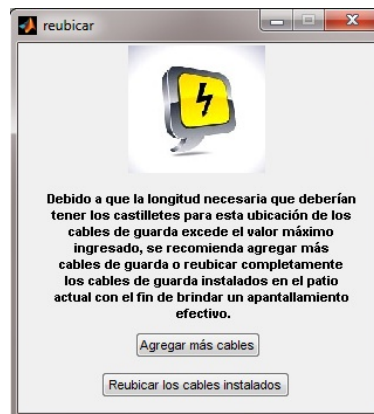
la segunda opción, se debe oprimir el botón **Simular el patio actual** y luego el botón **SIMULACION** en la ventana **p7** que se abrirá a continuación.



*Figura 36. Ventana decisión [1]*

En caso tal de que con esta longitud máxima no se consiga un apantallamiento efectivo, el software mostrará en el dibujo 3D los puntos en forma de asteriscos de color magenta en los cuales la esfera logra penetrar parcialmente el apantallamiento (la esfera es sostenida por los cables de guarda pero la altura de su punto más bajo es menor a la altura de la línea de transmisión) y además sugerirá al usuario (a través de la ventana **reubicar** como se ve en la Figura 37) que decida una acción a correctiva entre de las siguientes opciones:

- Agregar más cables
- Reubicar los cables instalados



*Figura 37. Ventana reubicar [1]*

Si se oprime el botón **Agregar más cables**, se abrirá la ventana **agregar\_cables** como se puede ver en la Figura 38, en la cual se presentan dos opciones:

- Agregar cables manualmente
- Importar archivo cables.txt

La primera opción permite agregar los cables de guarda de forma manual, de esta forma se abrirá de nuevo la ventana **p6** para que se proceda a ubicar cuantos cables de guarda se consideren necesarios.

La segunda opción le permite ingresar las coordenadas de los puntos de amarre de los cables a agregar mediante la importación del archivo cables.txt (Cabe aclarar que previamente se deberá abrir el archivo y agregarle las líneas de texto correspondientes a las coordenadas de los puntos de amarre de los nuevos cables debajo de las líneas de texto correspondientes a las coordenadas de los puntos de amarre de los cables que ya han sido instalados tal como se ha explicado anteriormente al momento de editar el archivo cables.txt.)

**NOTA:** Es importante agregar las líneas de texto correspondientes a las coordenadas de los puntos de amarre de los cables a agregar debajo de las líneas de texto correspondientes a las coordenadas de los puntos de amarre de los cables que ya han sido instalados en lugar de borrar el contenido del archivo y solamente colocar las líneas de texto correspondientes a las coordenadas de los puntos de amarre de los cables a agregar ya que el algoritmo avanza hasta la línea final del archivo inicial y agrega las líneas de texto siguientes (líneas que el usuario ha agregado) como los nuevos cables a agregar.

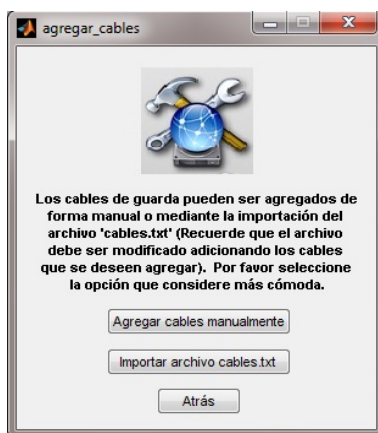


Figura 38. Ventana *agregar\_cables* [1]

En caso de seleccionar **Reubicar los cables instalados**, se abrirá la ventana *reubicar\_cables* como se puede ver en la Figura 39, la cual también presenta dos opciones:

- Reubicar cables manualmente
- Importar el archivo cables.txt



Figura 39. Ventana *reubicar\_cables* [1]

La primera opción permite ingresar las coordenadas de los puntos de amarre de los nuevos cables de guarda manualmente, en este caso se abrirá de nuevo la ventana **p6** y la figura 3D mostrará el patio sin los cables de guarda instalados, salvo aquellos que se encuentran en el perímetro ya que estos los ubica el software y no el usuario.

La segunda opción le permite ingresar las coordenadas de los puntos de amarre de los nuevos cables de guarda mediante la importación del archivo cables.txt (Cabe aclarar que previamente el se debe abrir el archivo y editarlo, cambiando la cantidad y las coordenadas de los puntos de amarre de los cables a instalar respecto de la cantidad y las coordenadas de los puntos de amarre de los cables de guarda instalados inicialmente).

Es importante recordar en este punto que el dibujo 3D **NO DEBE SER CERRADO BAJO NINGÚN MOTIVO** dado que es en él en donde se plasma gráficamente el proceso de apantallamiento, sin embargo, en caso de que el usuario por error cierre esta ventana, deberá dirigirse inmediatamente (sin llevar a cabo ningún proceso adicional) a la carpeta INTERFAZ y hacer doble click sobre el icono Dibujo3D.fig, el cual contiene la última vista con los últimos cambios hechos en dicha figura, se recomienda tener cuidado en este sentido, ya que en caso de cerrar la ventana que contiene el dibujo 3D y llevar a cabo acciones con el software sin reabrir previamente la figura como se acabó de explicar, se presentarán errores y el usuario se verá en la obligación de cerrar la herramienta y reiniciar el proceso desde el principio. Una vez tomadas las acciones correctivas según el criterio del usuario, aparecerá de nuevo la ventana **p7** (Figura 34) y se deberá repetir de nuevo el proceso, en este caso se debe oprimir nuevamente el botón **DISEÑO** y permitir a la herramienta realizar los cálculos respectivos. En caso de que esta vez el apantallamiento sea efectivo, se mostrará la ventana **decisión** (Figura 36) y de esta forma se podrá continuar con el siguiente patio.

Otro caso que puede presentarse es que al simular la esfera, el software encuentre que para ciertos puntos espaciales del patio la esfera logra penetrar la zona de protección (la esfera cae totalmente dentro de la zona delimitada por el perímetro de los pórticos sin tener contacto en ese punto con ningún cable de guarda) se mostrará en el dibujo 3D estos puntos en el “suelo” del patio en forma de asteriscos de color rojo e inmediatamente se abrirá la ventana **replantear** (Figura 40) en la cual se dan las siguientes dos opciones con el fin de que se tomen acciones correctivas en el diseño:

- Agregar más cables
- Reubicar los cables existentes



**Figura 40. Ventana replantear [1]**

Las acciones que realiza la herramienta para cualquiera de las dos opciones presentadas en esta ventana son las mismas que anteriormente se mostraron para la ventana **reubicar**.

Una vez tomadas las acciones correctivas según el criterio del usuario, aparecerá de nuevo la ventana **p7** (Figura 34) y se deberá hacer click en el botón **DISEÑO** para repetir de nuevo el proceso. En caso de que esta vez el apantallamiento sea efectivo, se mostrará la ventana **decisión** (Figura 36) y de esta forma se podrá continuar con el siguiente patio. Una vez terminado el apantallamiento de todos los patios, se exportarán los resultados al archivo de texto Resultados\_diseno.txt y aparecerá la ventana correspondiente al ingreso del apantallamiento de la caseta de control, pero este último proceso se describirá con más detalle en la sección Resultados.

## MODULO DE VALIDACIÓN

Al oprimir el botón **VALIDACIÓN**, la herramienta software simula la esfera rodante a lo largo y ancho de la zona de protección y encuentra los puntos de contacto entre el sistema de apantallamiento y la esfera teniendo en cuenta la altura de los castilletes para cada pórtico ingresada en la ventana de **p5** (Figura 26). Una vez la herramienta ha realizado los cálculos correspondientes, se muestra el resultado del análisis en cuanto a la efectividad del apantallamiento del sistema ingresado, las opciones que pueden presentarse son las siguientes:

### **Apantallamiento no efectivo debido a la existencia de puntos vulnerables:**

Este caso se presenta cuando el sistema de apantallamiento presenta algunos puntos vulnerables dentro de la zona a proteger en los cuales una descarga atmosférica peligrosa, cuya una corriente de retorno igual o mayor a la corriente crítica  $I_s$ , podría penetrar el apantallamiento y ocasionar daños en los equipos. Una vez encontrados estos puntos, se muestran en el dibujo 3D a modo de asteriscos de color rojo y la ventana **validación** (Figura 41) informará la razón por la cual el sistema de apantallamiento ingresado para ese patio no es efectivo. A continuación, se deberá tener en cuenta este resultado para los análisis o reportes respectivos, además de los puntos en el dibujo 3D, y proceder a oprimir el botón **Validar el siguiente patio** para ingresar los datos del siguiente patio a validar, o el botón **Simular el patio actual** el cual desplegará la ventana **p7** únicamente con la opción de simulación habilitada y se deberá oprimir el botón **SIMULACIÓN**. Esta opción permite simular el patio que se ha acabado de validar con el fin de aplicar los dos procesos (validación y simulación) simultáneamente patio por patio. Una vez finalizado este proceso, aparecerá un mensaje indicando que puede continuar con el proceso de validación del siguiente patio.

**NOTA:** En caso de oprimirse el botón **Validar el siguiente patio**, se abrirá la ventana **p4** para que el se puedan ingresar los datos eléctricos del siguiente patio a validar, o se cargarán automáticamente los datos eléctricos, de pórticos y cables de guarda en caso de que se estén validando los patios de un proyecto guardado y que previamente ha sido cargado en la ventana **seleccion**.



*Figura 41. Ventana validación [1]*

#### **Apantallamiento no efectivo debido a la longitud insuficiente de los castilletes:**

Este caso se presenta cuando la longitud de los castilletes del sistema de apantallamiento es deficiente y por lo tanto ante descargas atmosféricas peligrosas ocurrirá que los cables de guarda no tendrán la altura necesaria para interceptar dichas descargas antes que los objetos a proteger. Al suceder esto el sistema de apantallamiento no es efectivo al igual que el caso anterior y por lo tanto se muestra la ventana de alerta **validación2** (Figura 42) en la cual se informa esta anomalía. Al igual que en el caso anterior, se deberá tener en cuenta este resultado para los análisis o reportes respectivos y proceder a oprimir el botón **Validar el siguiente patio** para ingresar los datos del siguiente patio a validar, o el botón **Simular el patio actual** el cual desplegará la ventana **p7** únicamente con la opción de simulación habilitada y se deberá oprimir a continuación el botón **SIMULACIÓN**. Esta opción permite simular el patio que se ha acabado de validar con el fin de aplicar los dos procesos (validación y simulación) simultáneamente patio por patio. Una vez finalizado este proceso, aparecerá un mensaje indicando que puede continuar con el proceso de validación del siguiente patio.

**NOTA:** En caso de oprimirse el botón **Validar el siguiente patio**, se abrirá la ventana **p4** para que se al ingreso de los datos eléctricos del siguiente patio a validar, o se cargarán automáticamente los datos eléctricos, de pórticos y cables de guarda en caso de que se estén validando los patios de un proyecto guardado y que previamente ha sido cargado en la ventana **seleccion**.



Figura 42. Ventana validación2 [1]

#### Apantallamiento efectivo:

En caso de que el sistema de apantallamiento ingresado represente un sistema efectivo de blindaje, se abre la ventana *efectivo* (Figura 43) y el software le informa que el sistema ofrece un blindaje efectivo. Se deberá tener en cuenta este resultado para los análisis o reportes respectivos y proceder a oprimir el botón **Validar el siguiente patio** para ingresar los datos del siguiente patio a validar, o el botón **Simular el patio actual** el cual desplegará la ventana *p7* únicamente con la opción de simulación habilitada y se deberá oprimir el botón **SIMULACIÓN**. Esta opción permite simular el patio que se ha acabado de validar con el fin de aplicar los dos procesos (validación y simulación) simultáneamente patio por patio. Una vez finalizado este proceso, aparecerá un mensaje indicando que puede continuar con el proceso de validación del siguiente patio.

**NOTA:** En caso de oprimirse el botón **Validar el siguiente patio**, se abrirá la ventana *p4* para proceder a ingresar los datos eléctricos del siguiente patio a validar, o se cargarán automáticamente los datos eléctricos, de pórticos y cables de guarda en caso de que se estén validando los patios de un proyecto guardado y que previamente ha sido cargado en la ventana *seleccion*.

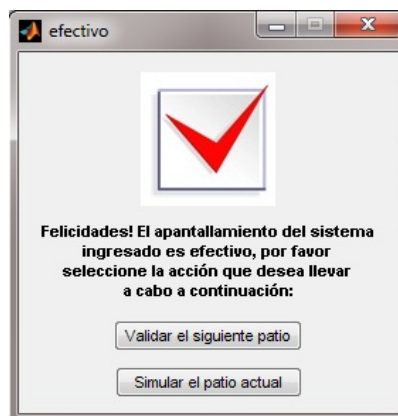


Figura 43. Ventana efectivo [1]

Al finalizar la validación de los patios, el software exporta los resultados al archivo de texto Resultados\_validacion.txt en donde el usuario podrá posteriormente analizarlos con más detalle.

## MÓDULO DE SIMULACIÓN

Al oprimir el botón **SIMULACIÓN**, la herramienta software desplegará automáticamente la ventana de ingreso de datos para la simulación *p8* como se ve en la Figura 44, la cual está dividida en tres secciones que solicitan los siguientes datos:

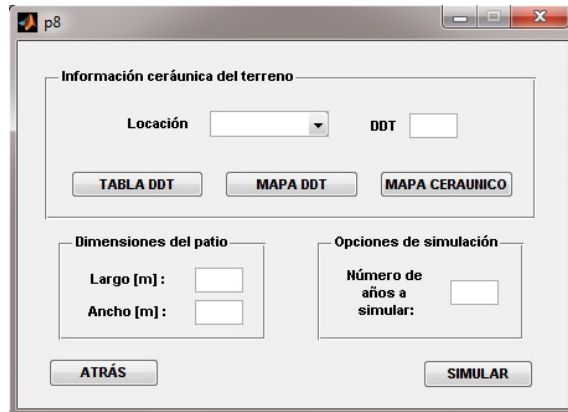


Figura 44. Ventana *p8* [1]

### Información cerámica del terreno:

- **Locación:** Lugar o región en la cual se encuentra la subestación, en caso de no encontrarse en la lista desplegable, deberá seleccionarse la opción **Otra**.
- **DDT:** Nivel de descargas directas a tierra para la locación seleccionada en el menú desplegable. En caso de haber seleccionado la opción “Otra” en el menú desplegable, se cuenta con el mapa de DDT de Colombia, el cual se despliega al oprimir el botón **MAPA DDT** y el mapa cerámico de Colombia oprimiendo el botón **MAPA CERAUNICO** con los cuales podrá ubicar un valor de DDT según la región más cercana en el mapa, o bien, calcular el DDT como de muestra en la fórmula (1) con ayuda del mapa cerámico siguiendo las líneas isocerámicas para ubicar la región más próxima.

$$DDT = 0.0017 * NC^{1,56} \quad (1)$$

### Dimensiones del patio:

- **Largo y Ancho:** Estos datos se ingresan para el cálculo del área del patio que se está simulando, las longitudes corresponden a las dimensiones en metros del rectángulo imaginario que encierra el patio a simular de modo que tanto los pórticos como los equipos queden dentro del área de dicho rectángulo.

### Opciones de simulación:

- **Número de años:** Cantidad de años para los cuales desea llevar a cabo la simulación.

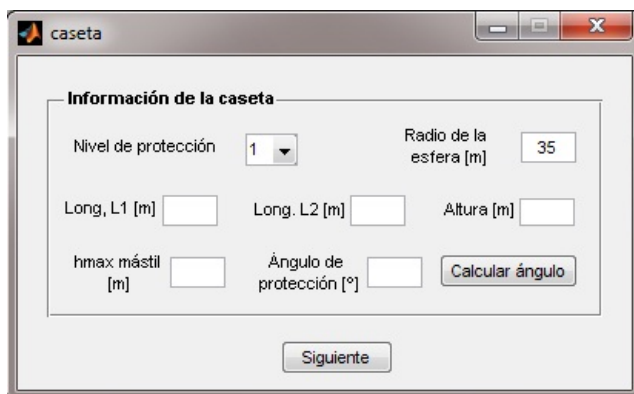
Una vez ingresados todos los datos, la herramienta software genera una cantidad de descargas atmosféricas (teniendo en cuenta el número de años y el valor del DDT ya que éste especifica el número de descargas por año por Km<sup>2</sup> que inciden sobre la región) de forma aleatoria basada en la probabilidad de corrientes de retorno para descargas atmosféricas establecida para Colombia y calcula el punto en el cual dicha descarga caerá, bien sea en un cable de guarda que la intercepta o en el suelo del patio que se está simulando mostrando

en el dibujo 3D, los puntos en forma de asteriscos en color azul representando las descargas que captaron los cables de guarda, los puntos en forma de asteriscos en color verde aquellas descargas que penetran el apantallamiento pero no son peligrosas y los puntos de forma de asteriscos en color rojas aquellas descargas peligrosas que penetran el apantallamiento y que debieron ser apantalladas. Simultáneamente al mostrar esta información, se abrirá automáticamente la ventana de ingreso de datos del patio para continuar con el siguiente patio.

Al finalizar la simulación de los patios, el software exporta los resultados al archivo de texto Resultados\_simulacion.txt en donde podrán ser analizados posteriormente con más detalle.

### CASETA DE CONTROL

La ventana para realizar el apantallamiento de la caseta de control será visible una vez se haya terminado de apantallar todos los patios de la subestación. Debido a que la herramienta software está enfocada al diseño del apantallamiento de los patios de la subestación eléctrica, éste módulo no está disponible en simultáneo con el módulo de validación ya que para el caso de la caseta de control se podrá solamente realizar el diseño de su sistema de apantallamiento. La ventana *caseta* se muestra en la Figura 45 y permite ingresar la información necesaria para realizar los cálculos de las longitudes de los mástiles con los cuales se protegerá la estructura civil, en este caso la herramienta software no usa cables de guarda teniendo en cuenta las recomendaciones citadas por la Norma Técnica Colombiana NTC 4552-3, y en la cual se aconseja apantallar este tipo de construcciones civiles empleando mástiles y utilizando el método de ángulos fijos. A continuación se describe cada uno de los datos de ingreso necesarios en este módulo.



The image shows a software window titled 'caseta'. Inside the window, there is a section titled 'Información de la caseta'. This section contains several input fields and buttons:

- 'Nivel de protección' with a dropdown menu showing the value '1'.
- 'Radio de la esfera [m]' with a text input field containing the value '35'.
- 'Long. L1 [m]' with an empty text input field.
- 'Long. L2 [m]' with an empty text input field.
- 'Altura [m]' with an empty text input field.
- 'hmax mástil [m]' with an empty text input field.
- 'Ángulo de protección [°]' with an empty text input field.
- A button labeled 'Calcular ángulo'.
- A button labeled 'Siguiente' at the bottom of the window.

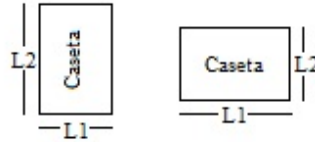
Figura 45. Ventana caseta [1]

**Nivel de protección:** Es el resultado del estudio de riesgo que deberá hacer el diseñador previamente (dado que este ítem se sale de los alcances del presente proyecto) para la estructura civil teniendo en cuenta los pasos a seguir en este procedimiento que indica la NTC 4552-3. Se debe seleccionar en el menú desplegable si el nivel de protección es 1, 2, 3 o 4.

**Radio de la esfera:** Conforme al método de ángulos fijos y el nivel de protección seleccionados, se asume la protección contra descargas atmosféricas que se simulan mediante una esfera de radio  $r$ , dicho radio depende del nivel de protección y aumenta conforme al nivel de protección; este valor lo selecciona el software automáticamente.

**Long. L1 y Long. L2:** Estos valores corresponden a las dimensiones del área de la caseta de control; es importante para el diseñador prestar atención en este paso ya que los resultados que entregue el análisis de la herramienta serán indicados con base en estos datos. Las dos formas en que se pueden ingresar estas dimensiones se aprecian en la Figura 46, en donde puede notarse que tanto L1 como L2 pueden ser el ancho o

el largo de la estructura según lo decida el diseñador. La importancia de tomar nota respecto a esto radica en que al interpretar los resultados, el software indicará cuantos mástiles se deberán ubicar a lo largo de L1 y de L2, razón por la cual deberá tenerse presente que longitud de la ingresada corresponde a L1 y cual a L2. Estos datos se ingresan en metros [m].



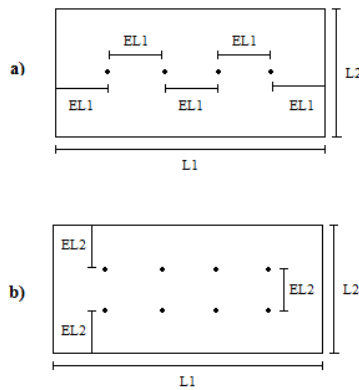
**Figura 46. Dimensiones de la caseta (Vista de planta) [1]**

**Altura:** Este valor corresponde a la altura de la caseta de control medida desde el nivel del suelo hasta el techo de la misma. Este valor se ingresa en metros [m].

**Hmáx mástil:** Este valor corresponde a la longitud máxima práctica o comercial de los mástiles con los que pueda contar el constructor y que deberá tener en cuenta el diseñador. El software toma este valor para calcular el número mínimo de mástiles para proteger una zona (asumiendo inicialmente su longitud máxima) y luego recalcula el valor de la longitud de los mástiles a usar al encontrar el número exacto de mástiles con los que puede proteger determinada zona. Este valor se ingresa en metros [m].

**Ángulo de protección:** Este valor corresponde al ángulo de protección que tendrá cada mástil ubicado sobre el techo de la caseta de control, para su cálculo se debe oprimir el botón **CALCULAR ÁNGULO** y a continuación se mostrará una ventana con las curvas de altura vs ángulo de protección para cada uno de los cuatro posibles niveles de protección. Se debe tener en cuenta el nivel de protección y con este dato ubicar la curva correspondiente (I, II, III, o IV), una vez ubicada la curva se procede a ver en el eje de las abscisas (ángulo de protección) el valor correspondiente a la altura del terminal (altura sobre el nivel del suelo del extremo superior del terminal) y verificar en que valor de ángulo corta la curva; ese valor de ángulo será el valor máximo que podrán tener los mástiles para ese nivel de protección y ubicados a una altura, según el criterio del diseñador podrá seleccionar ese valor máximo o un valor ligeramente inferior que le brinde un rango de confianza; luego de seleccionar el valor del ángulo de protección se debe cerrar la ventana de las curvas e introducir el valor del ángulo en la casilla correspondiente. Este valor se ingresa en grados [°].

Al terminar de ingresar los datos en su totalidad, Se debe oprimir el botón **Siguiente** y la herramienta procederá a calcular el número de mástiles a lo largo de L1 y a lo largo de L2 que deberán instalarse en el techo de la caseta de control. En este caso, en el archivo de resultados se encontrará la cantidad total de mástiles a instalar en el techo de la caseta de control y la altura mínima que deberá tener cada uno de ellos, además dos campos llamados Espaciamiento a lo largo de L1 (EL1) y Espaciamiento a lo largo de L2 (EL2) los cuales son la distancia en metros existente entre mástiles consecutivos así como entre mástil más hacia el extremo del techo y el borde de este tal como se puede apreciar en la Figura 47.

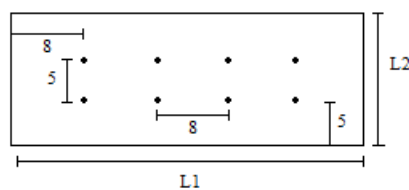


**Figura 47. Vista de planta de la caseta de control. [1]**  
**a) Espaciamiento a lo largo de L1 (EL1). b) Espaciamiento a lo largo de L2 (EL2)**

La interpretación de las cantidades de mástiles a lo largo de L1 y L2 va de la mano con EL1 y EL2, teniendo en cuenta que el número de mástiles a lo largo de L1 indica la cantidad de mástiles que se ubican en una fila a lo largo de L1 mientras que el número de mástiles a lo largo de L2 indica la cantidad de filas de mástiles que irán a lo largo de L2, por su parte EL1 indica el espaciado que hay entre mástiles y entre el borde del techo y mástil correspondientes al número de mástiles a lo largo de L1, y a su vez, EL2 indica el espaciado que hay entre mástiles y entre el borde del techo y mástil correspondientes al número de mástiles a lo largo de L2. A modo de ejemplo supongamos que el resultado arrojado por el software es el siguiente:

Número de mástiles a lo largo de L1	4
Espaciamiento a lo largo de L1 [m]	8
Número de mástiles a lo largo de L2	2
Espaciamiento a lo largo de L2 [m]	5

Dado que a lo largo de L1 se deben ubicar 4 mástiles espaciados entre sí 8 metros (una fila de 4 mástiles) y que el número de mástiles que deben ir a lo largo de L2 es 2 (dos filas de mástiles) espaciados 5 metros, el resultado gráfico visto desde planta para la ubicación de los mástiles se puede apreciar en la Figura 48.

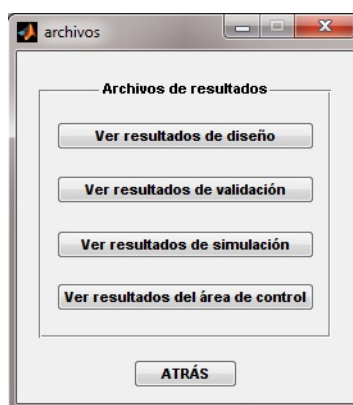


**Figura 48. Vista de planta de la ubicación de los mástiles en el techo de la caseta de control [1]**

Finalmente el software muestra una figura en la cual puede verse la ubicación de los mástiles desde una vista de planta similar a la Figura 48, y se exportan los resultados al archivo de texto Resultados\_caseta.txt en donde se podrá posteriormente analizarlos con más detalle, al igual que se guarda automáticamente la figura en la carpeta INTERFAZ bajo el nombre Apantallacasete.fig, con el fin de que pueda ser igualmente analizado posteriormente.

## RESULTADOS

Una vez terminados los procesos aplicados a la subestación bajo estudio (diseño, validación, simulación o sus combinaciones), se abre de nuevo la ventana **p2** (Figura 17). Hay dos formas mediante las cuales los archivos de resultados pueden ser visualizados, la primera es directamente desde el directorio C:\HSPDASE\Proyectos\_realizados, teniendo en cuenta que una vez visualizados debe seleccionar de nuevo la carpeta INTERFAZ como directorio actual de trabajo (Current Directory) en caso de que desee seguir usando la herramienta, tal como se explica al inicio del Capítulo 3 de este documento. La segunda forma, permite visualizar los archivos de texto más cómodamente a través de la ventana **archivos** que se despliega al oprimir el botón **VER RESULTADOS** en la ventana **p2**, como se ve en la Figura 49.



*Figura 49. Ventana archivos [1]*

Dependiendo del proceso de cálculo que haya sido aplicado al sistema ingresado, aparecerán habilitados los botones para visualizar los archivos de diseño, validación simulación y caseta, los cuales se abrirán en el editor de texto de MatLab al oprimir el botón correspondiente a cada uno. Se recomienda cerrar los archivos de texto con los resultados obtenidos una vez se haya terminado su análisis correspondiente.

De manera general, todos los resultados obtenidos por el software se muestran en archivos de texto y gráficos según se haya usado o no cada módulo, los cuales se encuentran contenidos en la subcarpeta con el nombre del proyecto dentro del directorio C:\HSPDASE\Proyectos\_realizados. Estos archivos son los siguientes:

- Resultados\_diseno.txt
- Resultados\_validacion.txt
- Resultados\_simulacion.txt
- Resultados\_caseta.txt
- Dibujo3D.fig
- Dibujo3D\_simula.fig
- Apantallacaseta.fig

De igual manera, conforme se avanza en el análisis del sistema de apantallamiento de la subestación en estudio, la herramienta crea unos archivos de texto con los datos físicos y eléctricos del terreno y de cada uno de los patios, con el fin de que posteriormente pueda ser consultada o usada por parte del usuario de forma manual o a través de la herramienta mediante la opción de cargar un proyecto guardado. Estos archivos son los siguientes:

- Informacion\_del\_terreno.txt
- Datos\_electricos\_del\_patio\_de\_XXX\_kV.txt
- Porticos\_del\_patio\_de\_XXX\_kV.txt

- Cables\_a\_instalar\_en\_patio\_de\_XXX\_kV.txt

Los tres últimos archivos se crean para cada patio ingresado, y XXX representa la tensión de dicho patio. Todos estos archivos son automáticamente exportados y guardados en la subcarpeta con el nombre del proyecto dentro de la carpeta INTERFAZ como soporte de los resultados obtenidos para los procesos aplicados a la subestación en estudio.

Finalmente si el usuario así lo desea, puede imprimir estos resultados desde el editor de texto de MatLab con el fin de conservar una copia física de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la herramienta a las subestaciones eléctricas evaluadas.

## MANEJO DE LOS ARCHIVOS DE TEXTO

Para el manejo de los archivos de texto que se usan en la herramienta para los procesos donde se opta por importar los archivos de texto, es importante tener en cuenta varios aspectos relacionados con la manera de cómo la herramienta importa la información contenida en dichos archivos. A continuación se hacen unas aclaraciones en cuanto a este tema, con el fin de que el usuario pueda no solo evitar ventanas de error que la herramienta le arroje sino también que obtenga el máximo provecho de la misma mediante la edición de los archivos de texto.

### Nombre de los archivos:

Como se mencionó en los capítulos pasados, la herramienta tiene la opción de exportar los archivos que contienen la información de las coordenadas de los pórticos, y los puntos de amarre de los cables de guarda a instalar para cada uno de los patios de la subestación. Estos archivos tienen el siguiente formato respectivamente:

Porticos\_del\_patio\_de\_XXX\_kV.txt

Cables\_a\_instalar\_en\_patio\_de\_XXX\_kV.txt

En donde XXX representa el nivel de tensión del patio. Estos archivos, deben guardarse dentro de la carpeta HSPDASE, y por defecto la herramienta trae ya los archivos de texto creados y en blanco (solo contienen las líneas de comentarios), listos para ser editados como se explicó en cada caso. Sin embargo, estos archivos por defecto existen para 5 niveles de tensión que son:

500; 230; 115; 34,5 y 13,2 kV

Pese a esto, la herramienta está en capacidad de trabajar cualquier nivel de tensión, inclusive si no se encuentra dentro de este grupo de 5 tensiones normalizadas para Colombia, algunas subestaciones del país se pueden encontrar tensiones nominales de 220 y 13.8 kV. Para estos casos, el usuario debe cambiar el nombre de alguno de los archivos que no use para esa subestación o sencillamente editar cualquiera de los archivos que trae la herramienta por defecto y guardarlo en la carpeta INTERFAZ con el nombre correspondiente a la tensión que maneje ese patio siguiendo el formato preestablecido para cada uno de los archivos.

Al momento de colocar el nombre, debe tenerse en cuenta que si la tensión del patio no corresponde a un número entero sino que es un número decimal, como por ejemplo 34.5 kV, en este caso, se debe reemplazar en el nombre del archivo el separador decimal por un guión de piso de la siguiente forma:

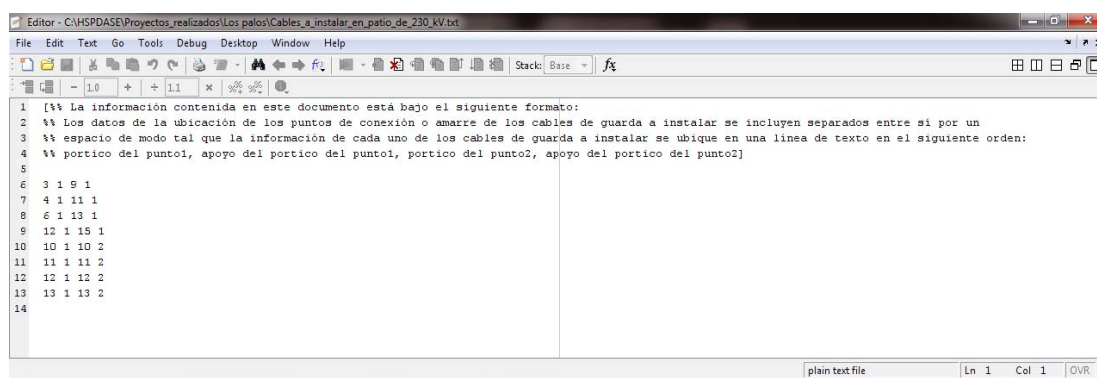
Porticos\_del\_patio\_de\_34\_5\_kV.txt

## Cables\_a\_instalar\_en\_patio\_de\_34\_5\_kV.txt

En caso de no hacerse de esta forma, la herramienta no podrá leer el archivo ya que por defecto el sistema operativo del equipo presenta conflictos en el uso de símbolos, puntos y comas en los nombres de los archivos.

### Características de los archivos:

Todos los archivos de texto que se pretendan usar para la importación de la información de pórticos y cables de guarda a instalar cuentan con unas líneas de comentarios correspondientes a las indicaciones para el ingreso de la información en el archivo, y que comienzan con un corchete que abre hacia la derecha ([]) y terminan con otro corchete que abre hacia la izquierda ([]). Una línea más abajo se encuentra los datos numéricos organizados según el formato descrito en los comentarios, como puede verse en la Figura 50.



```
1 [%% La información contenida en este documento está bajo el siguiente formato:
2 %% Los datos de la ubicación de los puntos de conexión o amarre de los cables de guarda a instalar se incluyen separados entre sí por un
3 %% espacio de modo tal que la información de cada uno de los cables de guarda a instalar se ubique en una línea de texto en el siguiente orden:
4 %% portico del punto1, apoyo del portico del punto1, portico del punto2, apoyo del portico del punto2]
5
6 3 1 9 1
7 4 1 11 1
8 6 1 13 1
9 12 1 15 1
10 10 1 10 2
11 11 1 11 2
12 12 1 12 2
13 13 1 13 2
14
```

Figura 50. Formato de un archivo para el ingreso de los cables de guarda a instalar [1]

Estos corchetes que comienzan y finalizan los comentarios, son indicadores para la herramienta que diferencian los comentarios de los datos numéricos, que son finalmente los que interesan al momento de los cálculos, por lo tanto, TODO archivo nuevo deberá tener comentarios única y exclusivamente encabezando el archivo, que comiencen y terminen con corchetes como puede verse en el ejemplo, y además los comentarios de los archivos que tiene por defecto la herramienta no deben ser cambiados, modificados, o eliminados ni total ni parcialmente, puesto que se correría el riesgo de que la herramienta presente ventanas de error al momento de intentar importar la información contenida en estos archivos, o peor aún, importe los datos de forma errónea.

Teniendo en cuenta lo anterior, la única información que puede ser modificada es la numérica, teniendo en cuenta el formato para cada archivo y para el caso de números decimales, deberá usarse el punto como separador decimal.

### Edición y modificación de la información de los archivos de salida:

A medida que la herramienta realiza procesos a un proyecto, crea archivos de texto y exporta los resultados a ellos, guardándolos en la subcarpeta con el nombre del proyecto que se encuentra dentro de la carpeta `Proyectos_realizados` y que es creada una vez se oprime el botón **Crear proyecto** en la ventana *selección*. Estos archivos contienen la información de los resultados obtenidos para el diseño, la validación y/o la simulación dependiendo de cada caso.

En caso de que se desee realizar algunas modificaciones a un proyecto guardado bien sea en los pórticos, en los datos del terreno o en la información eléctrica y desee cargar dicha información en la herramienta, podrá hacerlo mediante la ventana *selección* siempre y cuando haya hecho las modificaciones correctamente, siguiendo el formato que establece cada archivo para la introducción de la información. De esta forma, podrá llevarse a cabo por ejemplo, la validación y/o simulación de un sistema de apantallamiento de un proyecto guardado al que se le hizo únicamente el diseño, modificando solamente los archivos correspondientes a la

información de los pórticos, reemplazando en cada línea el último dato (cero), el cual corresponde a la longitud del castillete, por la longitud del castillete obtenida a través de la herramienta y cuyo valor se encuentra en el archivo Resultados\_diseno.txt.

Otra utilidad que se puede obtener de la manipulación de los archivos de salida y el uso de la opción de cargar un proyecto guardado, sería la facilidad que implicaría el llevar a cabo el rediseño del sistema de apantallamiento de una subestación previamente evaluada, que haya presentado alguna expansión o modificación física, de modo tal que la reevaluación de su sistema de apantallamiento es de carácter obligatorio, lo cual se lograría fácilmente agregando las modificaciones de la subestación a los archivos de texto respectivos.

### EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

Para percibir el proceso establecido en la herramienta propuesta, se considera a modo de ejemplo el diseño del sistema de apantallamiento para una subestación eléctrica con las características mostradas en la Tabla 8:

<b>Nombre de la subestación</b>	Itaca
<b>Tipo de subestación</b>	Intemperie
<b>Cantidad de patios</b>	3
<b>Tensiones nominales de los patios kV</b>	230; 115 y 34,5

*Tabla 8. Información básica de la subestación [1]*

La información eléctrica de entrada de la subestación que se necesita para adelantar el proceso de validación, se resume en la Tabla 9:

<b>Patio de la S/E</b>	<b>No 1</b>	<b>No 2</b>	<b>No 3</b>
<b>Tensión. kV</b>	230	115	34,5
<b>BIL corregido. kV</b>	1050	550	200
<b>Dist. mínima f-t. m</b>	2,20	1,10	0,52
<b>Flecha máxima. m</b>	1	0,7	0,3
<b>Radio del conductor de fase. m</b>	0,015	0,010	0,007
<b>Altura de los pórticos. m</b>	15; 19 y 20	12	10
<b>Altura del elemento energizado más alto. m</b>	16	12	10
<b>Longitud de los castilletes. m</b>	5	3,2	1,5

*Tabla 9. Información eléctrica de la subestación [1]*

El terreno donde está ubicada la subestación presenta unos niveles de terracedo, esta información se puede ver en la Tabla 10 y en la Tabla 11:

<b>Ancho [m]</b>	130
<b>Largo [m]</b>	140
<b>Niveles de terracedo</b>	5

*Tabla 10. Información física del terreno [1]*

Nivel de terracedo	Coordenada yinicial [m]	Coordenada yfinal [m]	Altura sobre el nivel de referencia [m]
1	0	15	8,5
2	15	40	5,5
3	40	70	3,5
4	70	115	1
5	115	140	0

**Tabla 11. Información de los niveles de terracedo del terreno [1]**

La información referente a las coordenadas de los pórticos dentro de cada patio se resume en la Tabla 12.

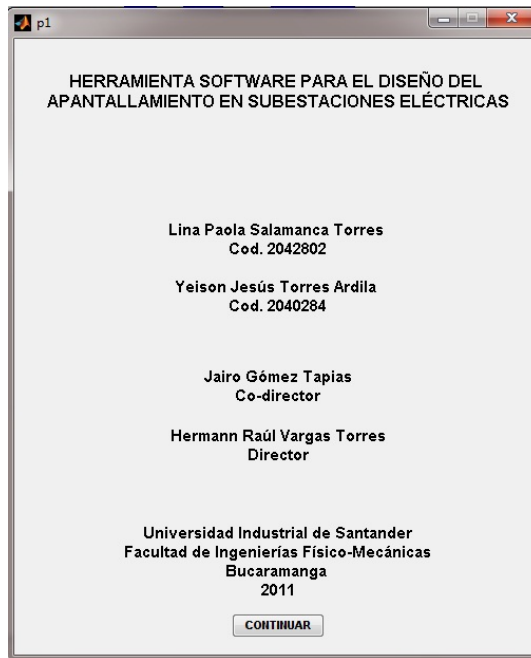
Tensión del patio [kV]	Nº de pórticos	Coordenada x1 [m]	Coordenada y1 [m]	Coordenada x2 [m]	Coordenada y2 [m]	Altura [m]
230	17	0	0	16,5	0	15
		16,5	0	33	0	15
		33	0	49,5	0	15
		66	0	82,5	0	15
		82,5	0	99	0	15
		99	0	115,5	0	15
		0	34,4	16,5	34,4	19
		16,5	34,4	33	34,4	19
		33	34,4	49,5	34,4	19
		49,5	34,4	66	34,4	19
		66	34,4	82,5	34,4	19
		82,5	34,4	99	34,4	19
		99	34,4	115,5	34,4	19
		49,5	66,9	66	66,9	20
		82,5	66,9	96,9	66,9	15
		96,9	66,9	105,5	66,9	15
		11,5	66,9	115,5	66,9	15
115	10	49,5	66,9	66	66,9	20
		82,5	66,9	96,9	66,9	15
		96,9	66,9	105,5	66,9	15
		115,5	66,9	115,5	66,9	15
		53,5	98	64	98	12
		64	98	74,5	98	12
		74,5	98	85	98	12
		95,5	98	106	98	12
		106	98	116,5	98	12
34.5	5	106	110,6	116,5	110,6	12
		108,75	136,6	113,75	136,6	10
		113,75	136,6	118,75	136,6	10
		118,75	136,6	123,75	136,6	10
		123,75	136,6	128,75	136,6	10

**Tabla 12. Información de los pórticos [1]**

Una vez realizada la instalación de la herramienta software en el equipo de computo (ver manual de usuario), para comenzar a usar la herramienta, el se debe iniciar MatLab haciendo doble click en el icono ubicado en el escritorio, o bien, en la carpeta donde se encuentre guardado.

Se procede a ubicar la carpeta INTERFAZ (la cual contiene el software), en el directorio actual de trabajo o Current Directory ubicado a la izquierda de la ventana de MatLab. Una vez se ha ubicado dicha carpeta en el directorio de trabajo, se hace doble click sobre su icono y a continuación aparecerán los archivos del código que conforman la herramienta software.

Luego de esto, se accede a la herramienta desde el prompt (>>) de MatLab escribiendo p1 y pulsando la tecla Enter, lo cual desplegará la ventana **p1** como se ve en la Figura 51.



*Figura 51. Ventana p1 [1]*

En esta ventana se puede ver la información acerca de los autores de la herramienta, el co-director y el director del proyecto, a continuación, se oprime el botón **CONTINUAR** y se despliega la ventana **p2** como se ve en la Figura 52.



*Figura 52. Ventana p2 [1]*

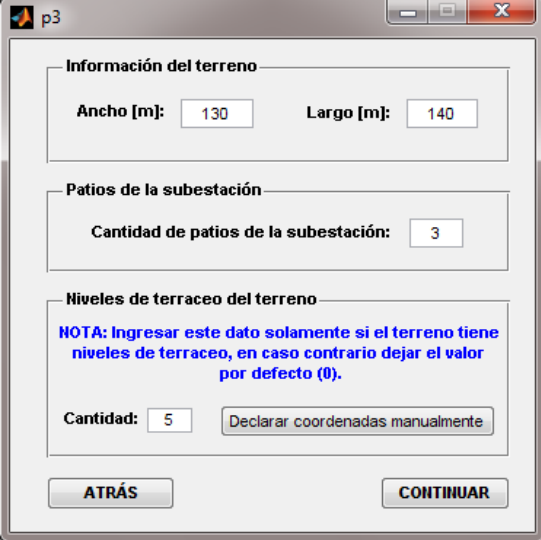
Esta ventana es la ventana inicial de la herramienta, en la cual se encuentra una fotografía de una subestación a modo de ambientación, así como la opción de salir, de ingresar el sistema y de ver los resultados, dado que no se ha ingresado ningún sistema y por ende no hay resultados que ver, la opción **VER RESULTADOS** se encuentra deshabilitada, esta opción se habilitará una vez se haya llevado a cabo algún proceso (diseño, validación y/o simulación) al sistema que se ingrese. Para continuar se oprime el botón **INGRESAR SISTEMA**, el cual despliega la ventana *seleccion* como se ve en la Figura 53.



*Figura 53. Ventana selección [1]*

Dado que se va a llevar a cabo el diseño del sistema de apantallamiento, se opta por la opción: Proyecto nuevo, y se escribe en el campo en blanco de la derecha el nombre de la subestación, que en este caso se llama Itaca como se ilustra en la Figura 53. Luego de esto, se oprime el botón **Crear proyecto** y se

desplegará la ventana *p3*, en la cual se ingresa la información contenida en la Tabla 10 y la Tabla 11 correspondiente a los datos físicos del terreno y de los niveles de terraceo, como se ve en la Figura 54. Es de destacar, que se debe establecer una ubicación imaginaria de los patios de la subestación sobre un eje de coordenadas *x-y*, en el cuadrante positivo, para de esta manera establecer las coordenadas de referencia de ubicación de los patios de la subestación; e ingresarlas a la herramienta.

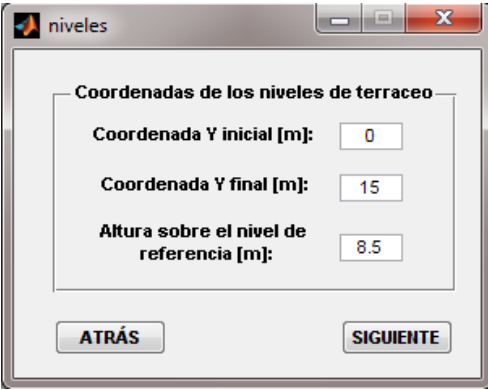


The screenshot shows a window titled 'p3' with three main sections: 'Información del terreno' with 'Ancho [m]: 130' and 'Largo [m]: 140'; 'Patios de la subestación' with 'Cantidad de patios de la subestación: 3'; and 'Niveles de terraceo del terreno' with a note: 'NOTA: Ingresar este dato solamente si el terreno tiene niveles de terraceo, en caso contrario dejar el valor por defecto (0).', 'Cantidad: 5', and a button 'Declarar coordenadas manualmente'. At the bottom are 'ATRÁS' and 'CONTINUAR' buttons.

Figura 54. Ventana *p3* [1]

Dado que el terreno donde se instala la subestación Itaca no es completamente plano, sino que cada patio se ubica sobre diferentes niveles de altura sobre el nivel de referencia, debido al terraceo que presenta el terreno a lo largo del eje *y* (a lo largo del desarrollo físico de la subestación), se deben ingresar las coordenadas para definir los rangos de los niveles de terraceo a lo largo del eje *y*.

Se ingresan, por lo tanto, los datos de ancho, largo, cantidad de patios de la subestación y la cantidad de niveles de terraceo, y a continuación se oprime el botón **Declarar coordenadas de los niveles**. Esta acción despliega la ventana *niveles* en la cual se ingresa dicha información, como se ve en la Figura 55.



The screenshot shows a window titled 'niveles' with a section 'Coordenadas de los niveles de terraceo' containing 'Coordenada Y inicial [m]: 0', 'Coordenada Y final [m]: 15', and 'Altura sobre el nivel de referencia [m]: 8.5'. At the bottom are 'ATRÁS' and 'SIGUIENTE' buttons.

Figura 55. Ventana *niveles* [1]

En esta ventana, se ingresan uno a uno los datos contenidos en la Tabla 11, oprimiendo el botón **SIGUIENTE** para ingresar la información de cada nivel (coordenada Y inicial, coordenada Y final, y la altura sobre el nivel de referencia).

Luego de ingresar las coordenadas de todos los niveles de terraseo (incluyendo el nivel de referencia), se oprime el botón **SIGUIENTE** y a continuación se vuelve a abrir la ventana **p3** con las opciones de ingreso de niveles de terraseo bloqueadas como señal de que ya han sido ingresados completamente la información de todos los niveles de terraseo.

A continuación se oprime el botón **CONTINUAR** en la ventana **p3**, para desplegar la ventana **p4** donde se ingresa la información correspondiente al primer patio a apantallar como se muestra en la Figura 56.

La información a ingresar en **p4** es la siguiente:

- a) Nivel de tensión del patio en kV.
- b) BIL (corregido por altura) en kV.
- c) Distancia mínima fase-tierra en metros.
- d) Altura del elemento energizado de mayor altura en metros.
- e) Flecha máxima del conductor de fase de la línea en metros.
- f) Número de conductores por fase.
- g) Radio del conductor de fase de la línea en metros.
- h) Espaciamiento entre conductores del haz en metros.
- i) Cantidad de pórticos de la subestación.
- j) Longitud máxima para los castilletes en metros.

INGRESO DE DATOS CORRESPONDIENTES AL PATIO NÚMERO: 1

**Datos eléctricos del patio**

Tensión [kV]: 230      BIL COR [kV]: 1050

DMF-T [m]: 2.2

**Datos físicos del patio**

AEEMA [m]: 16      MAXFL [m]: 1

**Información del conductor de la línea de transmisión**

Conductores por fase: 1      Radio del conductor [m]: 0.015

Espaciamiento entre conductores adyacentes del haz [m]: 0

**Datos de los pórticos**

Cantidad de pórticos: 17      LMDC [m]: 5

UBICAR PÓRTICOS MANUALMENTE

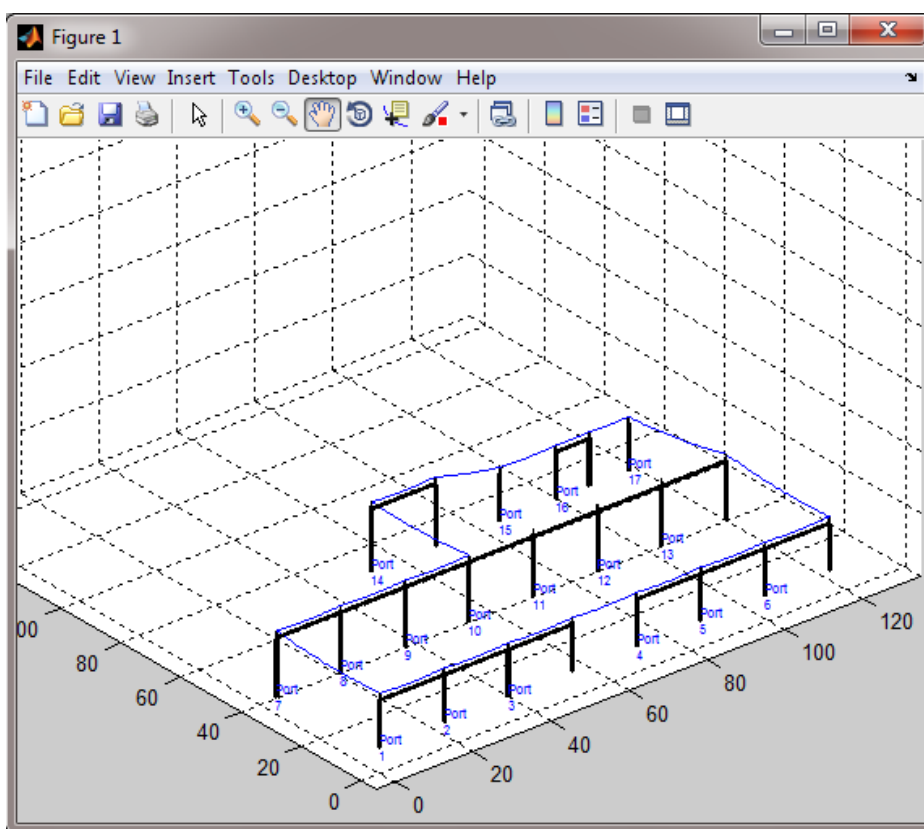
IMPORTAR ARCHIVO PORTICOS.TXT

ATRÁS

Figura 56. Ingreso de datos del patio de 230 kV de la subestación Itaca [1]

Luego de ingresar todos los datos, se selecciona la forma de ingreso de las coordenadas de los pórticos, en este caso se opta por la opción de la importación del documento de texto que contiene las coordenadas cartesianas donde se ubican cada uno de los pórticos, así como su altura. Para ver las pautas de la edición del documento de texto, por favor remitirse al capítulo 9 del presente documento.

Una vez se ha editado el archivo de texto y ubicado éste dentro de la carpeta INTERFAZ, se oprime el botón **IMPORTAR ARCHIVO PORTICOS.TXT**; a continuación la herramienta lee la información ingresada en el archivo de texto y realiza automáticamente los cálculos de la ubicación de los cables de guarda que encierran el contorno del patio de la subestación y los muestra en un dibujo 3D acompañado de los pórticos y sus respectivos castilletes que tendrán una altura inicial igual a la distancia mínima fase-tierra, como se muestra en la Figura 57.



*Figura 57. Dibujo 3D [1]*

La herramienta calcula los datos eléctricos para el proceso de apantallamiento, y lleva a cabo un estimado de la separación máxima recomendada y la separación máxima de diseño que podrían tener los cables de guarda adyacentes entre sí, con el fin de aprovechar la longitud inicial de cálculo de los castilletes (igual a la distancia mínima fase-tierra) y la longitud máxima para un castillete en ese patio (declarada en **p4**) respectivamente con el fin de lograr un apantallamiento efectivo. Esta información se muestra en la ventana **info** como se ve en la Figura 58.

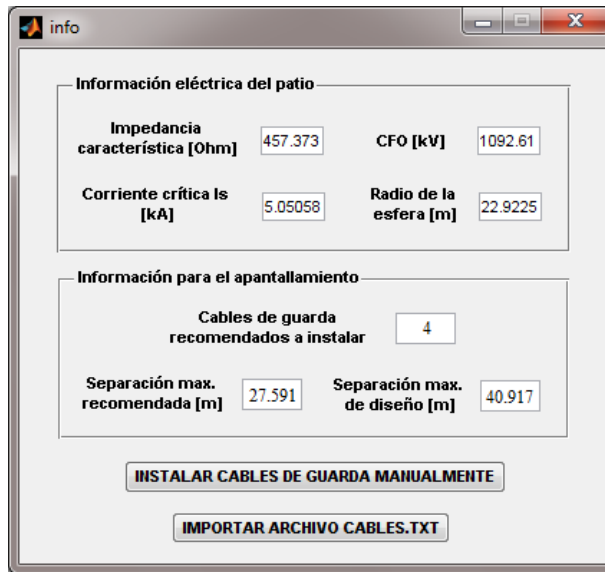


Figura 58. Ventana info [1]

Una vez el usuario ha tenido en cuenta estas estimaciones, se procede a ingresar las coordenadas de los puntos de apoyo de los cables de guarda a instalar, en este caso, se opta por la opción de importar el archivo de texto que contiene la información de la ubicación de los cables de guarda a instalar en el patio de 230 kV, y que previamente ha debido ser editado y ubicado en la carpeta INTERFAZ como se indica en el capítulo 9 de este documento.

Se oprime el botón **IMPORTAR ARCHIVO CABLES.TXT** y el software cargará automáticamente la información contenida en él, mostrándolo en el Dibujo 3D que luego de esto se verá como se muestra en la Figura 59.

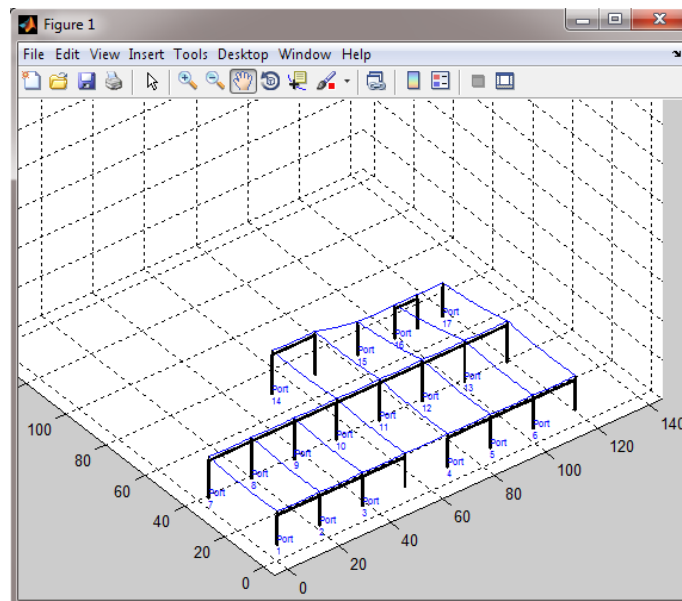
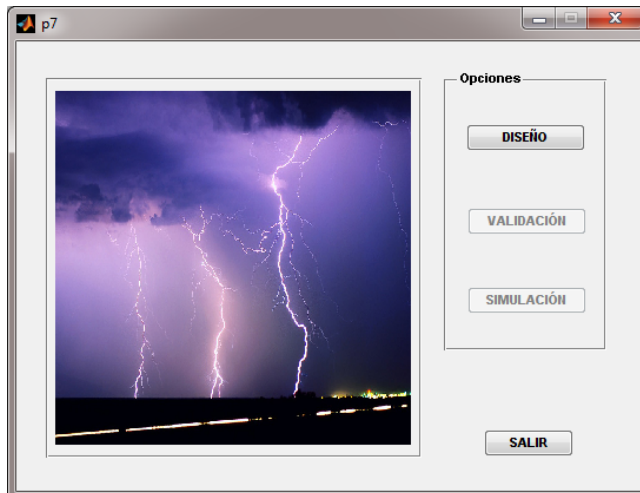


Figura 59. Dibujo 3D con cables de guarda incluidos [1]

Al mismo tiempo que se cargan gráficamente en el Dibujo 3D los cables de guarda instalados, se despliega la ventana **p7** en la cual aparece únicamente habilitada la opción de diseño, como se muestra en la Figura 60.



*Figura 60. Ventana p7 [1]*

A continuación, se oprime el botón **DISEÑO** para que la herramienta comience a realizar los cálculos de la altura de los castilletes del patio de 230 kV. A continuación aparece la ventana **aumento** en la cual se informa acerca de la longitud calculada para los castilletes de los pórticos del patio de 230 kV como se puede ver en la Figura 61.

Se oprime el botón **Continuar** para que la herramienta corrija dicha longitud en el Dibujo 3D y se vuelve a desplegar la ventana **p7**, en la cual se debe oprimir de nuevo el botón **DISEÑO** para verificar los cálculos del apantallamiento utilizando la longitud de los castilletes mostrada en la ventana **aumento**.



*Figura 61. Ventana aumento [1]*

Luego de que el software ha verificado que la longitud calculada es la correcta, se despliega la ventana **decisión** en la cual se informa que el diseño del patio de 230 kV ha finalizado, y a continuación se debe oprimir el botón **Continuar** como se muestra en la Figura 62.

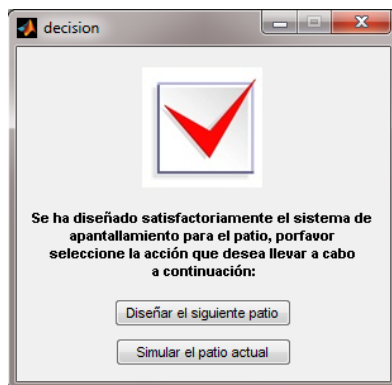


Figura 62. Ventana decisión [1]

Se despliega la ventana **p7** con únicamente la opción de simulación activada como se muestra en la Figura 63.

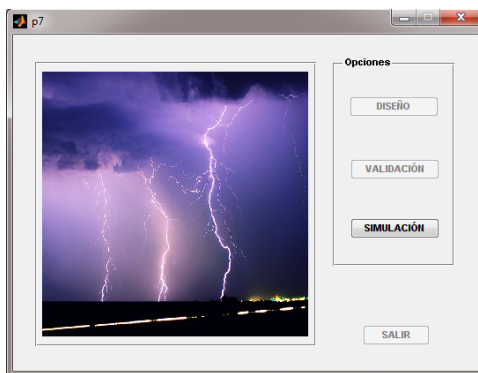


Figura 63. Ventana p7 con la opción de simulación habilitada [1]

Se oprime el botón **SIMULACIÓN** y se despliega la ventana **p8** como se muestra en la Figura 64.

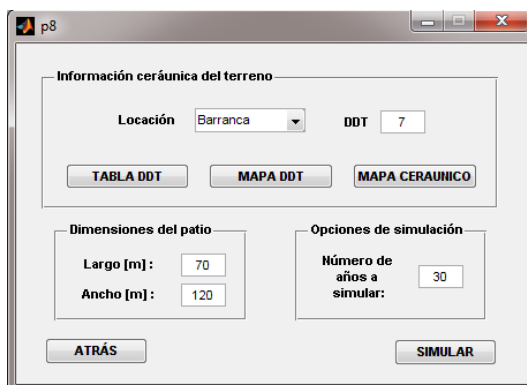


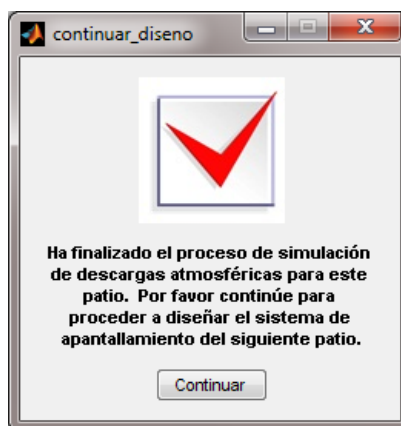
Figura 64. Ventana p8 [1]

En esta ventana se ingresa la información concerniente a la locación geográfica de la subestación eléctrica Itaca, las dimensiones de largo y ancho en metros del patio actual, así como también el número de años que se desee simular las descargas atmosféricas. La subestación eléctrica Itaca se ha asumido localizada en el municipio de Barranca, el cual tiene un nivel DDT igual a 7. La información concerniente a las dimensiones de los patios se puede ver en la Tabla 13, como se muestra a continuación:

Tensión del patio [kV]	Largo [m]	Ancho [m]
230	70	120
115	45	70
34,5	20	20

**Tabla 13. Dimensiones de los patios de la subestación [1]**

El número de años seleccionados para llevar a cabo la simulación es de 30. Toda esta información puede verse ingresada en la Figura 64, a continuación se oprime el botón **SIMULAR** para que la herramienta proceda a simular las descargas atmosféricas y las grafique en el Dibujo 3D mediante asteriscos de colores. Una vez ha finalizado la simulación del patio, se despliega la ventana **continuar\_diseño** en la cual se informa que la simulación ha terminado, como se muestra en la Figura 65.



**Figura 65. Ventana continuar\_diseño [1]**

A continuación se oprime el botón **Continuar** para continuar con el proceso de apantallamiento del siguiente patio, es decir, con el patio de 115 kV. Se despliega de nuevo la ventana **p4** y se procede de nuevo a repetir el mismo proceso indicado hasta este punto. La información correspondiente a los patios de 115 kV y de 34,5 kV se ingresa de la misma forma como se ingresó la información del patio de 230 kV. Luego de que se ha terminado el proceso de diseño y simulación del sistema de apantallamiento de los patios de la subestación Itaca se despliega la ventana **finalsimulación** indicando que se ha finalizado la simulación de todos los patios de la subestación, como se muestra en la Figura 66.

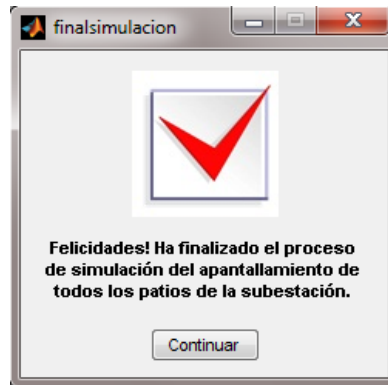


Figura 66. Ventana finalsimulación [1]

Se oprime el botón **Continuar** y se despliega la ventana *caseta* en la cual se ingresa la información física de las dimensiones de la caseta de control como se muestra en la Figura 67. A modo de ejemplo, se ha seleccionado un nivel de protección para la caseta igual a 4, el cual corresponde a un radio de la esfera de 55 metros. Para la selección del ángulo de protección, se oprime el botón **Consultar ángulo** y se despliega una figura que contiene 4 curvas, una por cada nivel de protección, con las cuales se calcula el ángulo de apantallamiento teniendo en cuenta el índice de protección para la selección de la curva a emplear y la altura sobre el nivel del suelo de la ubicación del mástil para encontrar el ángulo de protección, el cual corresponde al punto de intersección entre la curva y dicha altura. Para la curva 4 y una altura del mástil igual a 7,5 metros, el ángulo máximo es de aproximadamente  $70^{\circ}$ , por lo tanto se selecciona para este caso ese mismo ángulo, el cual, cumpliendo con la metodología, es menor o igual al ángulo máximo.

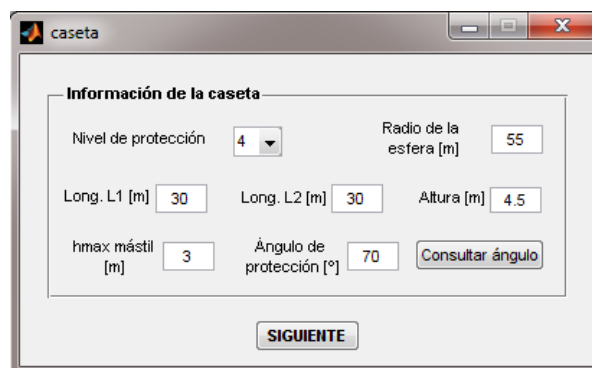
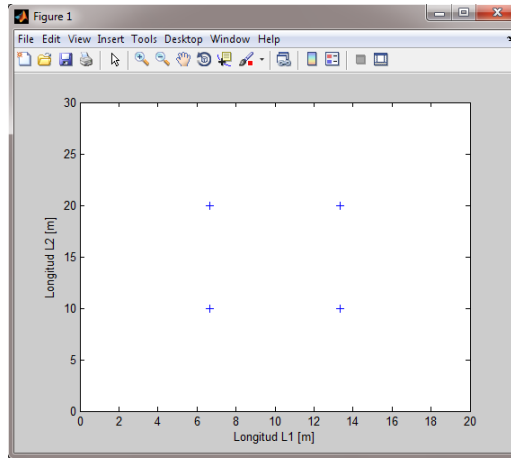


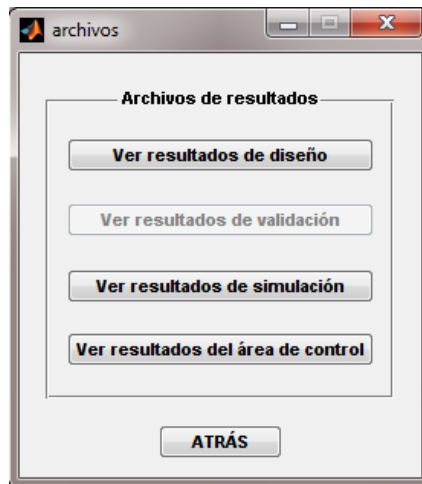
Figura 67. Ventana caseta [1]

Se oprime el botón **SIGUIENTE** y la herramienta calcula la longitud y el número de mástiles a ubicar en el techo de la caseta de control, mostrando la Figura 68, en la cual, las cruces azules representan la ubicación de cada uno de los mástiles del diseño.



**Figura 68. Vista de planta de la caseta de control [1]**

Al mismo tiempo, se despliega la ventana *finalcaseta* en la que se indica que el proceso de diseño del sistema de apantallamiento de la caseta de control ha finalizado. A continuación se oprime el botón **Continuar**, y se despliega de nuevo la ventana *p2*, pero ahora, el botón **VER RESULTADOS** está habilitado. Al oprimir este botón se despliega la ventana *archivos* como se muestra en la Figura 69, en la cual se muestran habilitadas los botones para visualizar los archivos de resultados de los procesos aplicados a la subestación Itaca, los cuales fueron diseño, validación y simulación, estos archivos se ven oprimiendo el botón correspondiente.



**Figura 69. Ventana archivos [1]**