



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y  
TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**SOFTWARE PARA CÁLCULOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS DE LÍNEAS DE  
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

**AYDA KAROL GISELE TORRES HOLGUIN  
AUTOR**

**M.Sc. LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ  
DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA  
2022**

**SOFTWARE PARA CÁLCULOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS DE LÍNEAS DE  
TRANSMISIÓN ELÉCTRICA**

**AYDA KAROL GISELE TORRES HOLGUIN  
AUTOR**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**DIRECTOR:  
M.Sc. LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA  
2022**

## **DEDICATORIA**

A mis padres William Torres y Nira Holguín, a mi abuela Josefa Piñeros de Holguín y mi abuelo Julio Salvador Holguín, que me apoyaron en todo el proceso de formación, por su incondicionalidad, por el apoyo moral y económico. Ustedes me enseñaron que se debe luchar por lo que se quiere, que renunciar estaba prohibido. Y que las mejores cosas toman su tiempo. A mi madre que me educó para verme una mujer independiente y profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis más profundos agradecimientos a todos los profesores que hicieron parte de mi formación académica:

Ingeniero Pablo Santafé, por compartir sus conocimientos para la materia que no olvidare, circuitos 2.

Ingeniero Luis David Pabón, a quien admiro por su capacidad de transmitir claramente sus conocimientos.

Ingeniero Edison Andrés Caicedo, por sus enseñanzas en la materia Líneas de Transmisión que fue una base fundamental para el desarrollo de este proyecto de grado.

Ingeniero Fredy Antonio Pico, tutor de mi practica en la Electrificadora de Santander, por su acompañamiento y asesoría para la realización de este proyecto.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Resumen</i> .....                                                                                | 13 |
| <i>Introducción</i> .....                                                                           | 14 |
| <i>Capítulo 1. Marco Contextual</i> .....                                                           | 15 |
| 1.1 Justificación .....                                                                             | 15 |
| 1.2 Objetivos .....                                                                                 | 15 |
| 1.2.1 Objetivo general.....                                                                         | 15 |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....                                                                   | 15 |
| 1.3 Acotaciones .....                                                                               | 15 |
| 1.4 Impacto ambiental .....                                                                         | 16 |
| 1.5 Legislación.....                                                                                | 16 |
| 1.6 Estado del Arte .....                                                                           | 17 |
| <i>Capítulo 2. Fundamentos Teóricos para el Cálculo Eléctrico en Líneas de Transmisión</i><br>..... | 20 |
| 2.1 Selección del nivel de tensión.....                                                             | 20 |
| 2.2 Parámetros para la selección del conductor .....                                                | 20 |
| 2.3 Efecto Corona.....                                                                              | 21 |
| 2.3.1 Densidad del aire .....                                                                       | 22 |
| 2.3.2 Coeficiente de rugosidad del conductor .....                                                  | 22 |
| 2.3.3 Coeficiente medioambiental .....                                                              | 23 |
| 2.4 Zonas de servidumbre .....                                                                      | 23 |
| 2.4 Cálculo de resistencia por unidad de longitud.....                                              | 25 |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5 Distancia media geométrica mutua.....                                                          | 25 |
| 2.6 Distancia media geométrica capacitiva propia .....                                             | 26 |
| 2.7 Distancia media geométrica inductiva propia .....                                              | 26 |
| 2.8 Reactancia inductiva por unidad longitud.....                                                  | 27 |
| 2.9 Reactancia capacitiva por unidad de longitud .....                                             | 28 |
| 2.10 Admitancia en paralelo .....                                                                  | 28 |
| 2.11 Impedancia en serie por unidad de longitud.....                                               | 29 |
| 2.12 Parámetros de la línea.....                                                                   | 29 |
| 2.12.1 Impedancia característica de la línea .....                                                 | 29 |
| 2.12.2 Constante de propagación por la longitud de esta .....                                      | 30 |
| 2.12.3 Constantes auxiliares del sistema .....                                                     | 30 |
| 2.13 Tensión y corriente de fase en la carga .....                                                 | 30 |
| 2.14 Tensión y corriente de fase en el extremo del generador.....                                  | 31 |
| 2.15 Regulación de tensión .....                                                                   | 31 |
| 2.16 Perdidas de potencia .....                                                                    | 31 |
| 2.17 Eficiencia de la línea.....                                                                   | 32 |
| <i>Capítulo 3. Fundamentos Teóricos para el Cálculo Mecánico en Líneas de Transmisión</i><br>..... | 33 |
| 3.1 Datos de fabricante.....                                                                       | 33 |
| 3.1.1 Sobrecarga en los conductores.....                                                           | 34 |
| 3.1.2 Resultante de carga total en viento .....                                                    | 34 |

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2 Catenaria.....                                               | 35        |
| 3.3 Flecha.....                                                  | 36        |
| 3.3.1 Longitud del cable.....                                    | 36        |
| 3.4 Cálculo de flechas y tensiones.....                          | 36        |
| 3.4.1 Ecuación cambio de estado .....                            | 37        |
| 3.4.2 Plantillado de la curva en caliente de la catenaria.....   | 38        |
| 3.5 Cálculo en estructuras y elementos de sujeción .....         | 39        |
| 3.5.1 Cargas Verticales.....                                     | 39        |
| 3.5.2 Cargas longitudinales .....                                | 40        |
| 3.5.3 Cargas transversales .....                                 | 40        |
| 3.5.4 Verificación de estructuras y elementos.....               | 43        |
| 3.5.5 Aisladores .....                                           | 44        |
| 3.6 Tipos de torres de transmisión.....                          | 46        |
| 3.6.1 Torres de suspensión .....                                 | 47        |
| 3.6.2 Torres de retención.....                                   | 48        |
| 3.6.3 Torre de Terminal o remate .....                           | 49        |
| <i>Capítulo 4. Desarrollo y funcionamiento del Software.....</i> | <i>51</i> |
| 4.1 Algoritmo para el cálculo eléctrico .....                    | 52        |
| 4.2 Algoritmo para cálculo efecto corona.....                    | 53        |
| 4.3 Algoritmo para el cálculo mecánico .....                     | 54        |
| 4.4 Funcionamiento del Software.....                             | 55        |

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.5 Inicio del software .....                                  | 57        |
| 4.6 Selección del conductor.....                               | 57        |
| 4.6.1 Conductores AAC .....                                    | 58        |
| 4.6.2 Conductores AAAC.....                                    | 59        |
| 4.6.3 Conductores ACAR.....                                    | 60        |
| 4.6.4 Conductores ACSR.....                                    | 61        |
| 4.6.5 Conductores ACSR/AW .....                                | 62        |
| 4.7 Elementos climáticos .....                                 | 63        |
| 4.8 Cálculos eléctricos.....                                   | 64        |
| 4.9 Cálculos mecánicos.....                                    | 65        |
| 4.10 Selección de estructuras.....                             | 68        |
| <i>Capítulo 5. Resultados de Diseño de línea de 115kV.....</i> | <i>71</i> |
| 5.1 Parámetros de diseño.....                                  | 71        |
| 5.2 Parámetros meteorológicos .....                            | 71        |
| 5.3 Parámetros electromecánicos.....                           | 72        |
| 5.4 Inicio de los cálculos .....                               | 72        |
| 5.5 Conclusiones.....                                          | 77        |
| 5.6 Glosario.....                                              | 78        |
| 5.7 Referencias .....                                          | 81        |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Ilustración 1. Ancho de la zona de servidumbre .....</i>                           | <i>25</i> |
| <i>Ilustración 2. Curva de tendido .....</i>                                          | <i>35</i> |
| <i>Ilustración 3. Variación de la catenaria para diferentes condiciones .....</i>     | <i>38</i> |
| <i>Ilustración 4. Tipos de cargas .....</i>                                           | <i>39</i> |
| <i>Ilustración 5. Aislador de porcelana .....</i>                                     | <i>45</i> |
| <i>Ilustración 6. Aislador de vidrio .....</i>                                        | <i>45</i> |
| <i>Ilustración 7. Aislador polimérico .....</i>                                       | <i>46</i> |
| <i>Ilustración 8. Clasificación de las torres según su posición en la línea .....</i> | <i>47</i> |
| <i>Ilustración 9. Torre de suspensión.....</i>                                        | <i>48</i> |
| <i>Ilustración 10. Torre de retención .....</i>                                       | <i>49</i> |
| <i>Ilustración 11. Torre de Terminal .....</i>                                        | <i>50</i> |
| <i>Ilustración 12. Algoritmo para los cálculos del software .....</i>                 | <i>51</i> |
| <i>Ilustración 13. Algoritmo para el cálculo eléctrico.....</i>                       | <i>52</i> |
| <i>Ilustración 14. Algoritmo para calculo efecto corona.....</i>                      | <i>53</i> |
| <i>Ilustración 15. Algoritmo para calculo mecánico.....</i>                           | <i>54</i> |
| <i>Ilustración 16. Activación complementos del software .....</i>                     | <i>55</i> |
| <i>Ilustración 17. Complementos de Excel .....</i>                                    | <i>56</i> |
| <i>Ilustración 18. Complemento solver .....</i>                                       | <i>56</i> |
| <i>Ilustración 19. Interfaz del programa .....</i>                                    | <i>57</i> |
| <i>Ilustración 20. Selección del conductor .....</i>                                  | <i>58</i> |
| <i>Ilustración 21. Número de alambres en conductor AAC .....</i>                      | <i>59</i> |
| <i>Ilustración 22. Número de alambres en conductor AAAC.....</i>                      | <i>60</i> |
| <i>Ilustración 23. Número de alambres en conductor ACAR.....</i>                      | <i>60</i> |

|                                                                             |                  |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|
| <b><i>Ilustración 24. Número de alambres en conductor ACSR .....</i></b>    | <b><i>61</i></b> |
| <b><i>Ilustración 25. Número de alambres en conductor ACSR/AW .....</i></b> | <b><i>62</i></b> |
| <b><i>Ilustración 26. Elementos climáticos .....</i></b>                    | <b><i>64</i></b> |
| <b><i>Ilustración 27 Hoja de cálculos eléctricos .....</i></b>              | <b><i>65</i></b> |
| <b><i>Ilustración 28. Cálculos mecánicos .....</i></b>                      | <b><i>66</i></b> |
| <b><i>Ilustración 29. Interfaz gráfica de la catenaria.....</i></b>         | <b><i>66</i></b> |
| <b><i>Ilustración 30. Calculo efecto corona .....</i></b>                   | <b><i>67</i></b> |
| <b><i>Ilustración 31. Selección de estructuras .....</i></b>                | <b><i>68</i></b> |
| <b><i>Ilustración 32. Tipo de estructura .....</i></b>                      | <b><i>69</i></b> |
| <b><i>Ilustración 33. Banco de información de estructuras .....</i></b>     | <b><i>69</i></b> |
| <b><i>Ilustración 34. Perfil de estructuras .....</i></b>                   | <b><i>70</i></b> |
| <b><i>Ilustración 35. Ventana de menú .....</i></b>                         | <b><i>73</i></b> |
| <b><i>Ilustración 36. Ventana de Cálculos eléctricos .....</i></b>          | <b><i>74</i></b> |
| <b><i>Ilustración 37. Cargas de los elementos de la línea.....</i></b>      | <b><i>76</i></b> |
| <b><i>Ilustración 38. Vista de perfil .....</i></b>                         | <b><i>76</i></b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1. Clasificación de los niveles de tensión .....</b>                  | <b>20</b> |
| <b>Tabla 2. Ancho de la zona de servidumbre de líneas de transmisión .....</b> | <b>24</b> |
| <b>Tabla 3. Constante Q .....</b>                                              | <b>41</b> |
| <b>Tabla 4. Coeficiente de exposición .....</b>                                | <b>42</b> |
| <b>Tabla 5. Categorías norma ASCE 74-2009 .....</b>                            | <b>42</b> |
| <b>Tabla 6. Factor de respuesta de ráfaga .....</b>                            | <b>43</b> |
| <b>Tabla 7. Características del conductor .....</b>                            | <b>71</b> |
| <b>Tabla 8. Parámetros meteorológicos .....</b>                                | <b>72</b> |
| <b>Tabla 9. Parámetros electromecánicos .....</b>                              | <b>72</b> |

## **Resumen**

El proceso para construir una línea de transmisión eléctrica de alta tensión, corresponde a la realización de un conjunto de cálculos eléctricos, mecánicos y la necesidad de un software que realice estos cálculos objeto de este trabajo de grado, estos cálculos se realizan a partir de las variables ambientales del lugar por donde pasa el tendido de la línea, el proceso metodológico empleado para el diseño de una línea será explicado y desarrollado de la manera cómo el software lo hace internamente.

Se explicará los fundamentos teóricos para el cálculo eléctrico y mecánico, parámetros para la selección del conductor, fenómeno eléctrico causado por la ionización del aire circundante a los conductores eléctricos, parámetros de la línea, regulación, pérdidas y eficiencia. Para los cálculos mecánicos los parámetros de la catenaria, flecha y tensiones.

Para el desarrollo del software se realizaron una serie de algoritmos que representan rápidamente el orden de ejecución del programa, así mismo los datos de entrada y las condiciones que se deben tener en cuenta para la validación de los datos.

## **Introducción**

El diseño de una línea aérea de transmisión de energía eléctrica requiere una gran cantidad de cálculos, que hacen necesario el uso de herramientas que realicen estos cálculos de manera rápida y eficaz a partir de los parámetros eléctricos de la línea, así como los elementos ambientales de la zona.

En la actualidad hay softwares muy buenos que realizan todos estos cálculos bajo licencia, que a su vez son de difícil acceso debido a la inversión de dinero que se requiere para adquirirlos.

El software creado en el presente trabajo de grado tiene como objeto realizar los cálculos que se dividen en eléctricos y mecánicos para el diseño de una línea de transmisión, además que permite la visualización de las curvas de la catenaria y la probabilidad de efecto corona en el funcionamiento de la elección del conductor.

El campo de aplicación de este software es tanto para su uso por parte de profesionales en ingeniería como para alumnos, con una alta utilidad y permite una interactividad cómoda con el usuario a través de un menú donde se ingresan los datos de entrada de la línea a diseñar en una hoja de Microsoft Excel y no requiere de ningún costo.

## **Capítulo 1. Marco Contextual**

### **1.1 Justificación**

Los softwares para el diseño de líneas de transmisión poseen un alto costo, además de esto en la Electrificadora (ESSA) en el área de proyectos los integrantes no tienen acceso rápido a un software para la formulación de proyectos en el diseño de líneas de transmisión eléctrica.

### **1.2 Objetivos**

#### ***1.2.1 Objetivo general***

Diseñar un software que facilite la obtención de datos de una línea de transmisión eléctrica.

#### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- Determinar los procedimientos de los cálculos requeridos en el diseño mecánico y eléctrico en las líneas de transmisión.
- Diseñar un algoritmo para el desarrollo del software aplicado para la obtención de datos al diseñar una línea de transmisión.
- Programar los algoritmos en un lenguaje de programación VBA en Microsoft Excel.
- Validar que su funcionamiento es correcto.

### **1.3 Acotaciones**

El software se diseñó para realizar cálculos eléctricos y mecánicos en líneas de alta tensión de 115kV y 230kV, para la realización de este trabajo de grado se va a utilizar la herramienta de Microsoft Excel donde se graban las operaciones e información que se requiere para la obtención de los cálculos eléctricos y mecánicos en una línea de transmisión eléctrica.

## **1.4 Impacto ambiental**

Para dar cumplimiento a un proyecto de líneas de transmisión de alta tensión se identifican alteraciones e impactos significativos con relación al medio ambiente en el proceso de planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento.

Decreto 1753 artículo 22 de 1994

“El estudio de impacto ambiental es un proceso que se debe llevar a cabo para la valoración y toma de decisiones respecto a la planificación ambiental exigida por las autoridades, las actividades que se realizan para ejecutar un proyecto producen impactos que necesitan ser mitigados por medidas de prevención y corrección. Requieren Estudio de impacto ambiental las líneas nuevas de transmisión, de tensión  $\geq$  a 220 kV. (Empresas de sector eléctrico, 1999)

Ley 143 artículo 12 de 1994 que expide el Congreso de la República

Para atender la demanda de energía el plan de expansión del sistema interconectado nacional debe ser flexible para que se ajuste a las condiciones técnicas, económicas y ambientales propuesta en los proyectos, para que la demanda sea cubierta con características de calidad respondiendo a criterios de uso eficiente y confiables establecidos por el Ministerio de Minas y Energía, el plan de expansión se realizara a corto y largo plazo. (Colombia, 1994)

## **1.5 Legislación**

“La resolución 025 de 1995 CREG”

En conformidad del artículo 23 de la ley 143 de 1994 establece en su sesión de 10 de julio de 1995 el código de redes como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional que está compuesto por:

- Código de Conexión

- Código de Operación
- Código de Medida

En el anexo cc.1 presenta los requisitos técnicos mínimos que debe reunir cualquier línea de transmisión a tensiones iguales superiores a 220kV, para su conexión al Sistema de transmisión nacional.

## **1.6 Estado del Arte**

Díaz Carolina, (2000) realizó la investigación “Diseño computarizado de líneas de transmisión” sobre los diferentes algoritmos aplicados para el diseño de esta, la metodología aplicada durante el desarrollo del trabajo es la deductiva a partir de los parámetros de selección de ruta, levantamiento topográfico, diseño mecánico, selección técnica económica y localización de apoyos. Este programa se realizó con la intención de disminuir el tiempo que requiere realizar los cálculos para un diseño de una línea eléctrica, haciendo uso de computadores y programas avanzados con herramientas de gran utilidad. Inicialmente se tiene en cuenta los fundamentos teóricos de los aspectos aplicados para el diseño y nombrados anteriormente, luego de establecer esos parámetros bajo lenguaje de programación de VISUAL BASIC 6.0 y AUTOCAD 2007 se establece una interfaz entre ambos programas que ofrecen resultados eficaces con características económicas y favorables para la construcción de líneas de transmisión.

Martínez Cristian, Díaz Ronald, (2017) realizaron el proyecto “Desarrollo de una aplicación que facilite el diseño de las líneas de transmisión que se encuentran en la región caribe” la problemática del proceso parte del alto costo que tienen los software para líneas de transmisión, a partir de esta problemática se consideraron las normas nacionales e

internacionales para llevar un orden en el proceso de diseño donde se deben ingresar parámetros generales de la línea para que desarrolle todos los cálculos internamente. Las normas que se establecieron para el diseño de la aplicación se validaron a partir de consultas a reglamentos, personas con experiencia en el área. Se eligieron las normas que están al alcance de este proyecto, un país en desarrollo requiere de una alta demanda de expansión energética y son muy pocas las empresas que realizan diseños de líneas de transmisión por su grado de complejidad al momento de realizar los cálculos, como no hay competencia en el diseño de proyectos de líneas siempre son las mismas empresas las que realizan estos trabajos ocasionando un alza en los proyectos, la herramienta que propone solucionar todo esto fue desarrollada en Microsoft Excel y Visual Basic.

Villeda Guerra Ernesto, (2013) realizó el proyecto 'Aplicación del programa dilate en el diseño de líneas de transmisión de energía eléctrica' el objetivo de este proyecto es explicar la metodología aplicada para el diseño de líneas de transmisión para que la herramienta computacional DILATE lo haga internamente, presentando las características su funcionamiento y los variables modificables, y como afectan éstas el diseño eléctrico de una línea, todo esto por medio de un ambiente gráfico amigable, con base en la facilidad que brinda la herramienta se trabajó en la creación de una línea aérea de 138kv demostrando por medio de ejercicios su funcionamiento en cada uno de sus módulos, respetando factores ambientales y eléctricos de las normas técnicas de construcción implementadas en el país. DILATE el estudio de la transmisión de energía puede simular varios tipos de escenarios, como lo son cambios en el tipo de carga y el aumento de la potencia demandada, pero no toma en cuenta para el diseño aspectos económicos.

López Parra Álvaro, (2013) realizó el proyecto 'Software para el cálculo eléctrico y mecánico de L.A.T. subterránea y aérea' cuando se va diseñar una red eléctrica de transmisión en alta tensión normalmente se tienen que realizar cálculos monótonos y tediosos que se deben realizar para cálculos eléctricos y mecánicos, que es el motivo por el que se crea una herramienta que ahorre todo este trabajo, que no requiere de ningún otro programa que tenga algún costo, el desarrollo de la aplicación se realiza con una herramienta en MATLAB llamada GUIDE (Graphical User Interface Development Environment) donde se establecen los métodos para hallar los cálculos en líneas aéreas y subterráneas.

## Capítulo 2. Fundamentos Teóricos para el Cálculo Eléctrico en Líneas de Transmisión

### 2.1 Selección del nivel de tensión

Para la selección del nivel de tensión, se debe tener en cuenta el Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE) donde se citan los niveles de tensión normalizados para sistemas de transmisión en Colombia.

Otras normas nacionales aplicables; Resolución CREG 097-2008; Art 1, NTC 2050.

En el **artículo 12** se estandarizan los siguientes niveles de tensión para sistemas de corriente alterna, los cuales se adoptan de la NTC 1340:

**Tabla 1. Clasificación de los niveles de tensión**

|                    |                                                                    |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Extra alta tensión | Tensiones superiores a 230 kV                                      |
| Alta tensión       | Tensiones mayores o iguales a 57,5 kV y menores o iguales a 230 kV |
| Media tensión      | Tensiones superiores a 1000 V e inferior a 57,5 kV                 |
| Baja tensión       | Tensiones mayores o igual a 25 V y menor o igual a 1000 V.         |
| Muy baja tensión   | Tensiones menores de 25 V                                          |

**Fuente: Retie**

### 2.2 Parámetros para la selección del conductor

Es necesario seleccionar el conductor más económico y técnicamente apropiado a las condiciones o elementos climáticos de una región o zona geográfica.

Dado que la selección del conductor requiere de características iniciales como la potencia a transmitir y el nivel de tensión seleccionado se calcula la corriente para sistemas trifásicos por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V_L * fp * n}$$

Donde:

P      potencia a transmitir en KW

$V_L$     tensión de diseño del sistema de transmisión en KV

fp      factor de potencia

n      número de conductores en haz

Se deberá determinar que los calibres de los cables cumplan con la corriente mínima calculada para cada configuración según el número de haz, la selección se realizara con la información suministrada por las tablas de fabricantes, ordenada por tipo de cable o composición.

### **2.3 Efecto Corona**

Es un fenómeno eléctrico producido por la ionización de partículas alrededor del cable, es decir el campo eléctrico que se produce alrededor del conductor, este campo es invisible al ojo humano.

En esta parte se quiere estimar la probabilidad de que haya efecto corona dada las condiciones propias de operación de la línea de transmisión. El criterio de selección se basa en el cálculo de la tensión critica disruptiva con base en el número de conductores por haz y la distancia entre ellos, las perdidas por corona empiezan a estar presentes desde el momento en que la tensión critica disruptiva es menor que la de la línea. (Checa, 1988)

Cálculo de la tensión crítica disruptiva:

$$V_c = 21,1 * mc * mt * \delta * n * r * \ln\left(\frac{D}{r}\right)$$

|          |                                            |
|----------|--------------------------------------------|
| mc       | coeficiente de rugosidad del conductor     |
| mt       | coeficiente medioambiental                 |
| $\delta$ | densidad del aire                          |
| n        | número de conductores en haz, de cada fase |
| r        | radio externo del conductor                |
| D        | distancia media geométrica                 |
| r        | radio medio geométrico                     |

### **2.3.1 Densidad del aire**

La densidad del aire es directamente proporcional a la temperatura, dada esta relación es importante los cálculos de capacidad calorífica del cable conductor para hallar las pérdidas por efecto corona y se calcula con la siguiente relación:

$$\delta = \frac{3,921 * h}{273 + \theta}$$

|          |                           |
|----------|---------------------------|
| h        | presión barométrica       |
| $\theta$ | Temperatura del conductor |

### **2.3.2 Coeficiente de rugosidad del conductor**

Los valores citados en (Checa, 1988) para este coeficiente son:

$mc = 1$  para hilos de superficie lisa

$mc =$  de 0,93 a 0,98 para hilos oxidados o rugosos

$mc =$  de 0,83 a 0,87 para cables

### **2.3.3 Coeficiente medioambiental**

Conocido como coeficiente meteorológico, que permite definir el efecto que produce la humedad (lluvia, niebla, nieve, escarcha) según (Checa, 1988) haciendo disminuir el valor de la tensión crítica disruptiva, sus valores son:

$mt = 1$  para tiempo seco

$mt = 0,8$  para tiempo húmedo

## **2.4 Zonas de servidumbre**

Basado en lo establecido en el RETIE las zonas de servidumbre deben ajustar a las siguientes consideraciones:

- a. Toda línea de transmisión aérea con tensión nominal igual o mayor a 57,5 kV, debe tener una zona de seguridad o derecho de vía.
- b. Dentro de la zona de servidumbre se debe impedir la siembra o crecimiento natural de árboles o arbustos que con el transcurrir del tiempo comprometan la distancia de seguridad y se constituyan en un peligro para las personas o afecten la confiabilidad de la línea.
- c. No se deben construir edificios, edificaciones, viviendas, casetas o cualquier tipo de estructuras para albergar personas o animales.

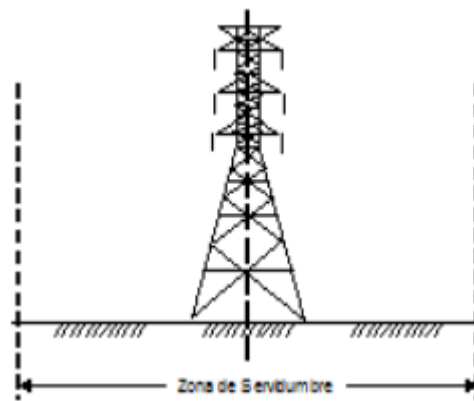
De acuerdo con las tensiones normalizadas en el país, se fijan los valores mínimos requeridos en el ancho de la zona de servidumbre, cuyo centro es el eje de la línea.

**Tabla 2. Ancho de la zona de servidumbre de líneas de transmisión**

| TIPO DE ESTRUCTURA | TENSION (kV)        | Ancho mínimo (m) |
|--------------------|---------------------|------------------|
| Torres/postes      | 500(2 Ctos.)        | 65               |
|                    | 500(1Cto.)          | 60               |
| Torres/postes      | 400(2Ctos)          | 55               |
|                    | 400(1Cto)           | 50               |
| Torres             | 220/230(2Ctos)      | 32               |
|                    | 220/230(1Cto)       | 30               |
| Postes             | 220/230(2Ctos)      | 30               |
|                    | 220/230(1Cto)       | 28               |
| Torres             | 110/115(2Ctos)      | 20               |
|                    | 110/115(1Cto)       | 20               |
| Postes             | 110/115(2Ctos)      | 15               |
|                    | 110/115(1Cto)       | 15               |
| Torres/postes      | 57,5/66(1 o 2 Ctos) | 15               |

**Fuente: RETIE**

### **Ilustración 1. Ancho de la zona de servidumbre**



**Fuente: RETIE**

## **2.4 Cálculo de resistencia por unidad de longitud**

Se llama resistencia a la capacidad de un material de oponerse al flujo de corriente, por tanto, de esta depende la resistividad del conductor frente a la temperatura del mismo y la frecuencia, la resistencia eléctrica de un conductor está dada por la siguiente ecuación:

$$r_L = \frac{r_c}{S}$$

$r_c$  resistencia de conductores por unidad de longitud en  $[\Omega/km]$

$S$  sección del conductor, en el caso de cables es la suma de las secciones rectas de los hilos componentes

## **2.5 Distancia media geométrica mutua**

Para determinar la DMG mutua se realiza con base en las distancias para cada una de las estructuras normalizadas.

$$DMG = \sqrt[3]{D_{ab} * D_{bc} * D_{ca}}$$

$D_{ab}$  es la distancia entre conductores de las fases a y b

$D_{bc}$  es la distancia entre conductores de las fases b y c

$D_{ac}$  es la distancia entre conductores de las fases a y c.

## 2.6 Distancia media geométrica capacitiva propia

Aproximando los conductores en haz a uno solo en el centro del haz se calcula la distancia media geométrica para cada una de las configuraciones según el número de conductores en haz.

Para un conductor:

$$D_s^c = r$$

Para dos conductores:

$$D_s^c = \sqrt[2]{d * r}$$

Para tres conductores:

$$D_s^c = \sqrt[3]{d^2 * r}$$

Para cuatro conductores:

$$D_s^c = \sqrt[4]{\sqrt{2} * d^3 * r}$$

$d$  es la distancia que hay entre los conductores de cada fase

$r$  radio del conductor

## 2.7 Distancia media geométrica inductiva propia

Aproximando los conductores en haz a uno solo en el centro del haz se calcula la distancia media geométrica para cada una de las configuraciones según el número de conductores en haz.

Para un conductor:

$$D_s^h = RMG$$

Para dos conductores:

$$D_s^h = \sqrt[2]{d * RMG}$$

Para tres conductores:

$$D_s^h = \sqrt[3]{d^2 * RMG}$$

Para cuatro conductores:

$$D_s^h = \sqrt[4]{\sqrt{2} * d^3 * RMG}$$

d es la distancia entre los conductores de cada fase

RMG es el radio medio geométrico del conductor

## 2.8 Reactancia inductiva por unidad longitud

La reactancia inductiva es la oposición de la corriente alterna por inductores, está dada por unidad de longitud para líneas equilibradas y se determina mediante la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente de inducción mutua, } L = 2 * 10^{-4} \ln \left( \frac{D_m}{D_s^h} \right) \left( \frac{H}{km} / fase \right)$$

$$\text{Reactancia inductiva} \quad X = 2 * \pi * f * L \left( \frac{\Omega}{km} \right)$$

f, frecuencia de la red 60 (Hz)

## 2.9 Reactancia capacitiva por unidad de longitud

La reactancia capacitiva por unidad de longitud para líneas equilibradas se determina mediante la siguiente expresión:

Por definición, la capacitancia C es igual a la carga entre la diferencia de potencia, así que (Vela, 2013)

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D_m}{D_s}\right)} * 1000 \quad \left(\frac{F}{km} / fase\right)$$

reactancia capacitiva  $X_c = \left(\frac{1}{2\pi f C}\right) (M\Omega/km)$

## 2.10 Admitancia en paralelo

La admitancia se compone de dos magnitudes eléctricas:

Conductancia  $G = \frac{P_p}{V^2} * 10^{-3} \quad \left(\frac{S}{km}\right)$

Pp    pérdidas de potencia en kilovoltio por kilometro

V<sup>2</sup>    Tensión por fase en Kv

Susceptancia  $B = 2 * \pi * f * C = \frac{1}{X_c} \left(\frac{S}{km}\right)$

Para el cálculo de la admitancia de la línea, se debe establecer el valor de la conductancia y la susceptancia. Una vez sea establecida la configuración para la cual la línea de transmisión no presenta efecto corona, se asume que la conductancia [G] es cero y se procede a la admitancia [B] a partir de la siguiente expresión: (Mujal, 2002)

$$\bar{Y} = G + j \frac{1}{X_c} (\Omega)$$

## **2.11 Impedancia en serie por unidad de longitud**

La impedancia se compone de dos magnitudes eléctricas:

$$\bar{Z} = r + jXL (\Omega/km)$$

## **2.12 Parámetros de la línea**

Con base en los valores de impedancia en serie y la admitancia en paralelo, se calcula la impedancia característica y la constante de propagación de la línea eléctrica, que se expresan en las siguientes ecuaciones:

### **2.12.1 Impedancia característica de la línea**

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{\bar{Y}}} (\Omega)$$

### **2.12.2 Constante de propagación por la longitud de esta**

$$\gamma l = \sqrt{Z * Y}$$

### **2.12.3 Constantes auxiliares del sistema**

(Mujal, 2002) Las constantes auxiliares serán las condiciones de funcionamiento, es un método que consiste en la aplicación directa de funciones hiperbólicas y circulares, considerándose las constantes (A), y (D) iguales, siempre que la línea funcione en régimen permanente y la carga sea equilibrada.

$$A = D = \cosh(\gamma l)$$

$$B = \overline{Z_c} \sinh(\gamma l)$$

$$C = \frac{1}{\overline{Z_c}} \sinh(\gamma l)$$

### **2.13 Tensión y corriente de fase en la carga**

Para facilitar los cálculos se toma el voltaje en el lado de la carga, como el voltaje de referencia para las demás tensiones y corrientes de la línea de transmisión.

$$V_r = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$Ir = \frac{P}{\sqrt{3} * V_L * fp * n}$$

$V_L$  Voltaje de línea

$P$  Potencia a transmitir

$fp$  Factor de potencia

## 2.14 Tensión y corriente de fase en el extremo del generador

$$Vg = AVr + BIr$$

$$Ig = CVr + DIr$$

$A, B, C, D$  Constante auxiliar

$Vr$  Voltaje de fase en la carga

$Ir$  Corriente de fase en la carga

## 2.15 Regulación de tensión

La regulación de tensión se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$Rv = \left( \frac{Vg}{\|A\| * \|Vr\|} - 1 \right) * 100$$

## 2.16 Perdidas de potencia

$$Pp = \frac{Pg - Pr}{Pr} * 100$$

## 2.17 Eficiencia de la línea

$$\eta = \frac{Pr}{Pg} * 100$$

### Capítulo 3. Fundamentos Teóricos para el Cálculo Mecánico en Líneas de Transmisión

Para el cálculo mecánico del conductor se utilizan los datos suministrados en las tablas de conductores por los fabricantes con los que se puede definir las tensiones y la flecha de los conductores para una determinada longitud del vano.

#### 3.1 Datos de fabricante

T Carga de rotura de la tabla de fabricante

t Carga de rotura aparente  $t = \frac{T}{A}$

A Área de la tabla de fabricante

Tr Carga de rotura real  $Tr = \frac{T}{F.S}$

tr Carga de rotura real aparente  $tr = \frac{t}{F.S}$

P Peso del conductor de la tabla de fabricante

Pa Peso aparente  $Pa = \frac{P}{A}$

h Parámetro de la catenaria

E Modulo de elasticidad

$\alpha$  Coeficiente de dilatación

- **Carga de rotura:** Es la carga que genera una falla de un elemento de la línea obtenido por medio de pruebas y dado por el fabricante en la tabla de conductores.
- **Carga de rotura aparente:** Es el esfuerzo al ocurrir la falla y se obtiene dividiendo la carga de rotura del conductor y el área de este.

- **Carga de rotura real:** Es el producto de la división de la carga de rotura aparente del conductor y el factor de seguridad.
- **Parámetro de la catenaria:** Es el producto de la división de la carga de rotura real sobre el peso del conductor.
- **Módulo de elasticidad:** Es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente (en la zona de comportamiento elástico de dicho material)

### **3.1.1 Sobrecarga en los conductores**

Normalmente por donde pasa el tendido de la línea existen agentes climáticos como el viento que produce una sobrecarga debida a la presión de este.

La carga del viento está dada por la siguiente ecuación:

$$pv = 42 \times 10^{-7} * dc * Vv$$

dc      diámetro del conductor en mm

Vv      velocidad del viento en Km/h

### **3.1.2 Resultante de carga total en viento**

$$pt = \sqrt{P^2 + pv^2}$$

P      peso del conductor en la tabla de fabricante

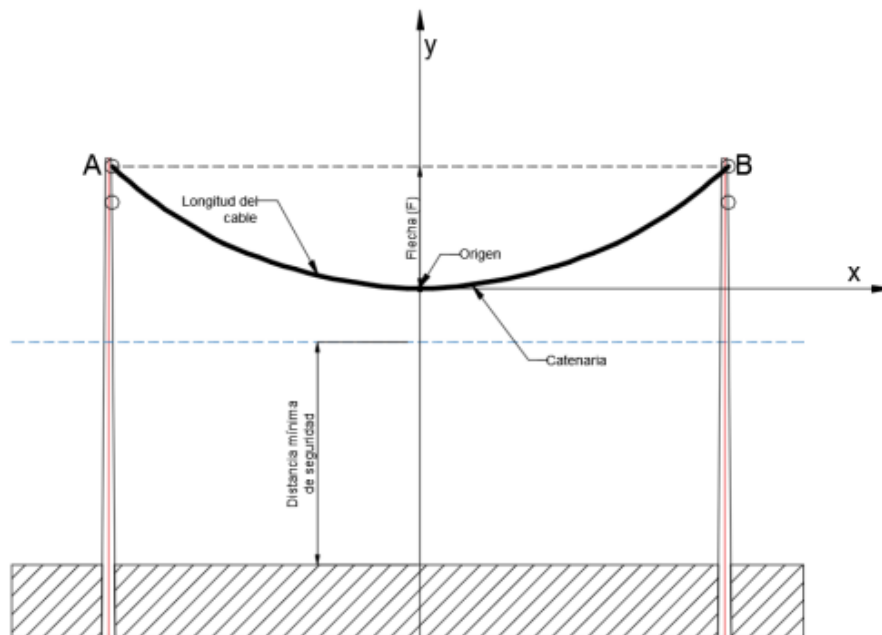
pv      carga del viento (kg/m)

### 3.2 Catenaria

La curva característica que se forma entre el apoyo A y B es la Catenaria. (ver Ilustración

2)

*Ilustración 2. Curva de tendido*



**Fuente: (EPM, 2019)**

Ecuación de la catenaria

$$y(x) = h \left[ \cosh \left( \frac{x}{h} \right) - 1 \right]$$

y      coordenadas en el eje y del cable en m

x      coordenadas en el eje x del cable en m

h      parámetro de la catenaria en m

$$h = \frac{Tr}{P}$$

### 3.3 Flecha

La flecha es la distancia máxima que existe entre el conductor y la recta que une los puntos de fijación de éste, es decir, la ordenada de la función entre los puntos A y B. (EPM, 2019)

$$f = h \left[ \cosh\left(\frac{a}{2h}\right) - 1 \right]$$

a Longitud del vano

h Parámetro de la catenaria

#### 3.3.1 Longitud del cable

$$L = (2h) \sinh\left(\frac{a}{2h}\right)$$

a Longitud del vano

h Parámetro de la catenaria

### 3.4 Cálculo de flechas y tensiones

Este cálculo se realiza a través de la ecuación de cambio de estado para condiciones limitantes citadas Resolución 025 de la CREG:

Hipótesis A. Máxima velocidad del viento (temperatura coincidente y viento máximo).

Hipótesis B. Mínima temperatura (temperatura mínima y sin viento).

Hipótesis C. Operación Diaria (Tensión diaria promedio, EDS).

Hipótesis D. Máxima flecha (Temperatura máxima, sin viento). (EPM, 2019)

### 3.4.1 Ecuación cambio de estado

Realiza el análisis para dos estados:

- Un conductor tendido en un vano, si se conoce la tensión (flecha) a una temperatura y una sobrecarga en estado inicial, se puede conocer los valores en estado final.
- Los conductores se ven sometidos a fuerzas del viento, temperatura ambiente debido a estas influencias se debe cumplir con valores admisibles como tensiones máximas, flechas verticales o inclinadas y distancias de seguridad.
- Todos los cálculos mecánicos de sobrecargas se hacen a partir del coeficiente de dilatación y modulo de elasticidad de cada material (EPM, 2019)

Estado A

$$A = \left( E * \alpha * (\theta_2 - \theta_1) - tr + \frac{E * a^2 * w^2 * m_1^2}{24 * tr^2} \right)$$

Estado B

$$B = \frac{E * a^2 * w^2 * m_2^2}{24}$$

### 3.4.2 Plantillado de la curva en caliente de la catenaria

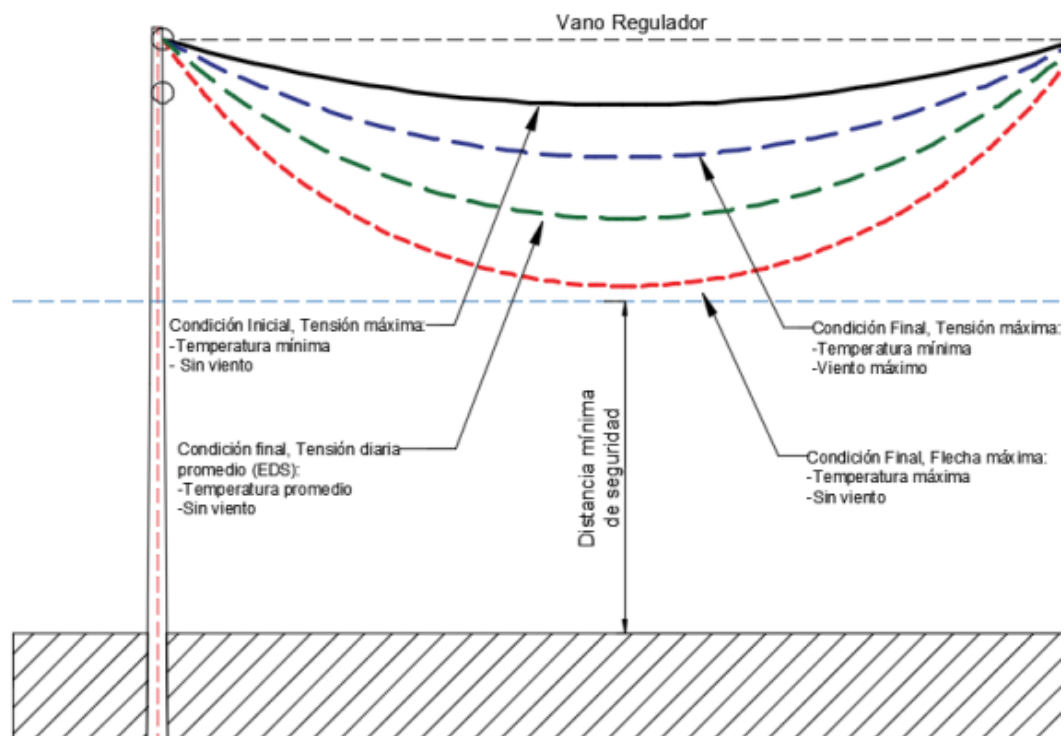
A partir de la ecuación de la catenaria establecida anteriormente se dispone a la elaboración de la plantilla por el método de la catenaria, eligiendo como punto de partida la hipótesis más desfavorable, se obtienen las hipótesis de carga por la ecuación de cambio de estado teniendo como variables las temperaturas de la zona por donde pasara el tendido.

Para cada una de estas variables obtendremos una tensión que formara la tabla de tendido para un determinado vano, donde:

X, es el vano para evaluar

Y, la altura de la catenaria

**Ilustración 3. Variación de la catenaria para diferentes condiciones**

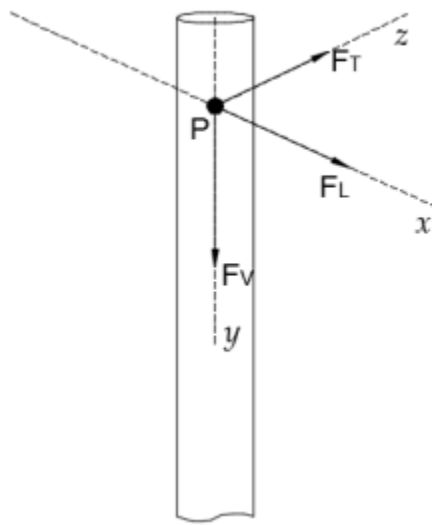


Fuente: (EPM, 2019)

### 3.5 Cálculo en estructuras y elementos de sujeción

Los conductores ejercen cargas que actúan sobre la estructura, dichas cargas tienen tres componentes, transversales, longitudinales y verticales que son definidas a continuación: (EPM, 2019)

**Ilustración 4. Tipos de cargas**



#### 3.5.1 Cargas Verticales

Son las cargas que actúan en dirección axial del poste, debida al peso de los conductores, peso de aisladores y demás componentes, está dada por la siguiente ecuación: (EPM, 2019)

$$FV = (Vp * Pu) + (PCA)$$

$Vp$  Vano peso, en m

$Pu$  Peso unitario del conductor en daN/m

$PCA$  Peso aisladores con herrajes y accesorios en daN/m

Cuando el terreno es quebrado el vano peso se puede tomar aproximadamente como el 40% mayor que el vano viento máximo del tipo de estructura y para terrenos planos se puede tomar aproximadamente el 20% mayor que el vano viento máximo del tipo de estructura.

### **3.5.2 Cargas longitudinales**

Son las cargas que actúan paralelamente a los conductores, generadas por el desbalance de tensiones mecánicas en los vanos reguladores y está dada por la siguiente ecuación: (EPM, 2019)

$$FL = \text{Max}(|TL_{iVR1} - TL_{iVR2}|)$$

$TL_{iVR1}$  Tensión longitudinal vano regulador adelante, en daN.

$TL_{iVR2}$  Tensión longitudinal vano regulador atrás, en daN.

Cuando los vanos reguladores adyacentes no son diferentes las cargas longitudinales son equivalentes a cero.

### **3.5.3 Cargas transversales**

Son las cargas que actúan perpendicularmente debido al efecto del viento sobre los conductores y elementos de sujeción, más la carga debida al efecto de la tensión del conductor al ser tendido en dirección al ángulo de deflexión de la línea y está dada por la siguiente ecuación: (EPM, 2019)

$$FT = (FTV + (FT\alpha))$$

### 3.5.3.1 Cargas transversal de viento

La fuerza resultante debida al viento, se basa en la metodología presentada en “Pautas para la carga estructural de líneas de transmisión eléctrica, tercera edición, manuales e informes de ASCE sobre la práctica de ingeniería n.º 74”

Dada por la siguiente ecuación: (EPM, 2019)

$$FTV = \gamma_{\omega} * Q * K_z * K_{zt} * (V_{pr})^2 * G * C_f * A$$

$\gamma_{\omega}$  factor de carga de viento, su valor es 1 para N=50 años.

Q Constante que convierte la energía cinética del aire en energía potencial de la presión del aire y depende de la temperatura ambiente y de la altitud sobre el nivel del mar, la constante se determina a partir de:

**Tabla 3. Constante Q**

| Temperatura ambiente | Altitud sobre el nivel del mar |       |       |       |       |       |
|----------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cº                   | 0                              | 1000  | 2000  | 2500  | 3000  | 3500  |
| 30                   | 0,582                          | 0,515 | 0,459 | 0,582 | 0,404 | 0,404 |
| 26                   | 0,590                          | 0,523 | 0,466 | 0,582 | 0,409 | 0,409 |
| 23                   | 0,596                          | 0,529 | 0,471 | 0,582 | 0,413 | 0,413 |
| 21                   | 0,600                          | 0,533 | 0,474 | 0,582 | 0,415 | 0,415 |
| 15                   | 0,613                          | 0,545 | 0,484 | 0,582 | 0,423 | 0,423 |
| 9                    | 0,622                          | 0,557 | 0,494 | 0,582 | 0,432 | 0,432 |
| 0                    | 0,627                          | 0,576 | 0,508 | 0,582 | 0,447 | 0,447 |

$K_z$  Coeficiente de corrección por altura de la estructura sobre el terreno

$$K_z = 2,01 * \left( \frac{Z_h}{Z_g} \right)^{\frac{2}{\alpha}}$$

$Z_h$  Es la altura total de la estructura

$Z_g$  se determina a partir de la **Tabla 4**

$\alpha$  Exponente que depende del tipo de terreno.

**Tabla 4. Coeficiente de exposición**

| Tipo de terreno | $\alpha$ | $Z_g$ |
|-----------------|----------|-------|
| B               | 7        | 366   |
| C               | 9,5      | 274   |
| D               | 11,5     | 213   |

Donde el tipo de terreno se define de la siguiente manera según la norma ASCE 74-2009:

**Tabla 5. Categorías norma ASCE 74-2009**

| Terreno | Características                                                                                                               |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B       | Áreas urbanas y suburbanas, con tamaño de viviendas unifamiliares.                                                            |
| C       | Terreno abierto con obstrucciones dispersas, incluye terrenos planos, campo abierto, granjas, pastizales expuestas al viento. |
| D       | Terrenos planos sin obstáculos y directamente expuestas a vientos provenientes de cuerpos de agua abiertos.                   |

$G$  Factor de respuesta a ráfaga de conductores y esta dada por la ecuación: (EPM, 2019)

$$G_w = \frac{1 + 2,7 * E * \sqrt{B_w}}{K v^2}$$

$K v$  Factor de velocidad se toma un valor 1,43

$$B_w = \frac{1}{1 + \frac{0,80 * S}{L_s}}$$

$$E = 4,9 * \sqrt{K} * \left(\frac{10}{Z_h}\right)^{1/\alpha_{FM}}$$

- $S$  Vano viento en diseño, en m
- $Z_h$  Altura total de la estructura
- $L_s$  Escala de turbulencia **Tabla 6**
- $K$  Coeficiente de fricción de la superficie **Tabla 6**
- $\alpha_{FM}$  Exponente de viento **Tabla 6**

**Tabla 6. Factor de respuesta de ráfaga**

| Tipo de terreno | $\alpha_{FM}$ | K      | Ls |
|-----------------|---------------|--------|----|
| B               | 4,5           | 0,01   | 52 |
| C               | 7             | 0,005  | 67 |
| D               | 10            | 0,0033 | 76 |

### 3.5.3.2 Fuerza transversal de ángulo

$$FT\alpha = |T_{iVR1} - T_{iVR2}| * \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$T$  tensión longitudinal máxima para viento máximo y temperatura mínima, en daN.

$\alpha$  Angulo de deflexión de la línea

(EPM, 2019)

### **3.5.4 Verificación de estructuras y elementos**

El método de cálculo por el cual se verifica la estructura es ASD (Esfuerzos admisibles), donde la carga actuante divididos en la carga de rotura, sea menor o igual que el factor de seguridad. (EPM, 2019)

$$\frac{Fa}{F_R} \leq FS$$

$Fa$  Fuerza actuante

FS      Factor de seguridad

F<sub>R</sub>      Fuerza resistente

#### 3.5.4.1 Fuerza actuante

$$Fa = \sqrt{FL^2 + Fv^2 + FT^2}$$

### **3.5.5 Aisladores**

Los aisladores son elementos que sujetan los conductores, manteniéndolos aislados de la tierra y de otros conductores, las características básicas que deben cumplir los aisladores son una resistividad alta y una gran resistencia mecánica en redes de alta tensión.

Los materiales más empleados para aisladores son:

- Aislador de porcelana
- Aislador de vidrio
- Aislador compuesto
- Aislador polimérico

#### 3.5.5.1 Aisladores de porcelana

Son aisladores resistentes a compresión utilizados para el diseño de suspensión con acoplamiento a rótula, sometido a pruebas eléctricas, antes y después del montaje.

***Ilustración 5. Aislador de porcelana***



#### 3.5.5.2 Aisladores de vidrio

Están compuestos de un material más económico que la porcelana con una elevada dureza, con un coeficiente de dilatación muy alto que limita su utilización en lugares con variación alta de temperatura, estas características hacen que los aisladores de vidrio sean más utilizados que los de porcelana.

***Ilustración 6. Aislador de vidrio***



#### 3.5.5.3 Aislador polimérico

Está compuesto por un núcleo central de fibra de vidrio y una cubierta exterior aislante de material polimérico, livianos y resistentes con aletas de diseño aerodinámico.

***Ilustración 7. Aislador polimérico***

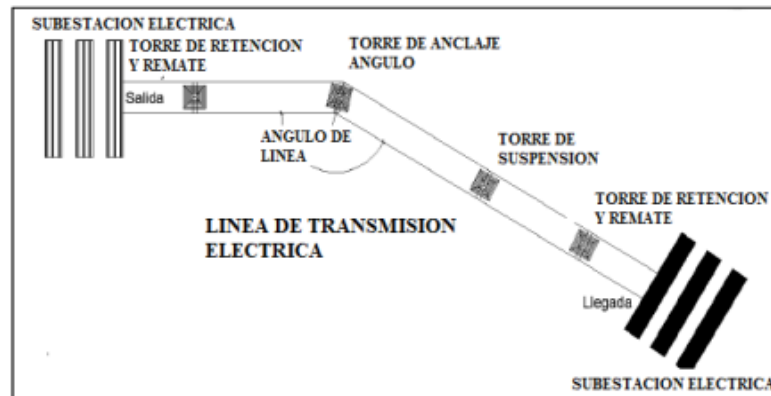


### **3.6 Tipos de torres de transmisión**

Las torres son un conjunto de barras unidas mediante nodos construida en celosía de acero para soportar los conductores en el transporte de energía eléctrica, una vez que se establece el tipo base de estructura, son diseñadas según la ruta de la línea y el tipo de terreno donde serán ubicadas.

Las torres se clasifican según el uso dentro de la línea como se puede ver en **Ilustración 8.**

**Ilustración 8. Clasificación de las torres según su posición en la línea**



### **3.6.1 Torres de suspensión**

Las torres de suspensión soportan el peso de conductores, aisladores y herrajes debido a las fuerzas transversales y verticales, son torres que carecen de fuerza longitudinal, utilizadas en los tramos rectos de la línea eléctrica.

### ***Ilustración 9. Torre de suspensión***



#### ***3.6.2 Torres de retención***

Esta torre al igual que la torre de suspensión soporta el peso de conductores y elementos de sujeción, usualmente se encuentra en el inicio o final de la línea donde requiera un cambio de dirección para evadir montañas, obstáculos o centros poblados.

***Ilustración 10. Torre de retención***



### ***3.6.3 Torre de Terminal o remate***

Estas torres son colocadas al inicio de una línea de transmisión, pueden soportar cargas longitudinales grandes, normalmente son más robustas que las anteriores, se utilizan como estructuras terminales o de seccionamiento para una larga línea que consta de estructuras de anclaje y suspensión.

***Ilustración 11. Torre de Terminal***

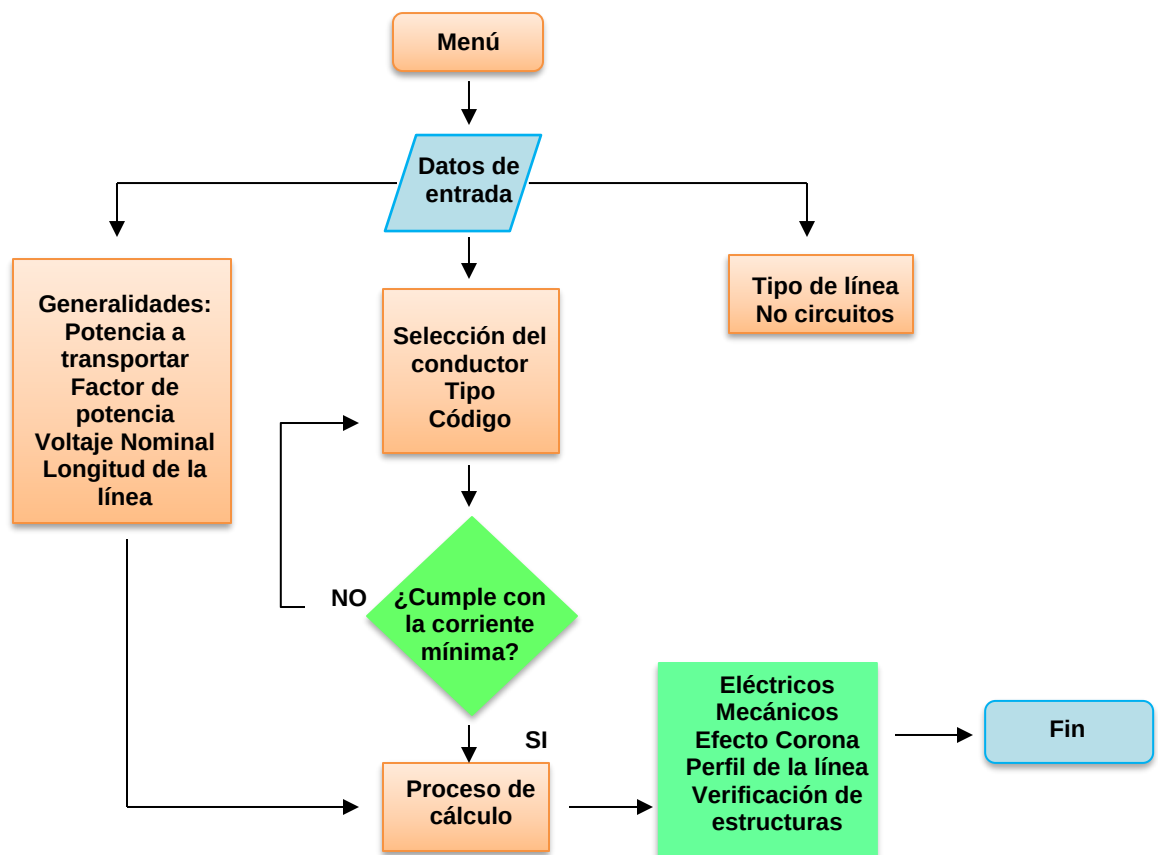


## Capítulo 4. Desarrollo y funcionamiento del Software

El proceso para el desarrollo de software se realizó a través de una serie de algoritmos creados para establecer los parámetros para los cálculos que describen su enfoque para diferentes actividades que tienen lugar durante el proceso. Los algoritmos fueron programados en un lenguaje de programación VBA en la herramienta Microsoft Excel.

El desarrollo del software se basa en el cálculo eléctrico y mecánico de los conductores para el diseño de líneas eléctricas, inicialmente el programa necesita datos de entrada que se le deben suministrar según los requerimientos de la línea, además cuenta con cuatro opciones de cálculo y a su vez una lista amplia de conductores que se pueden utilizar para el diseño. El algoritmo creado para la programación del software y su funcionamiento se puede (ver **Ilustración 12**)

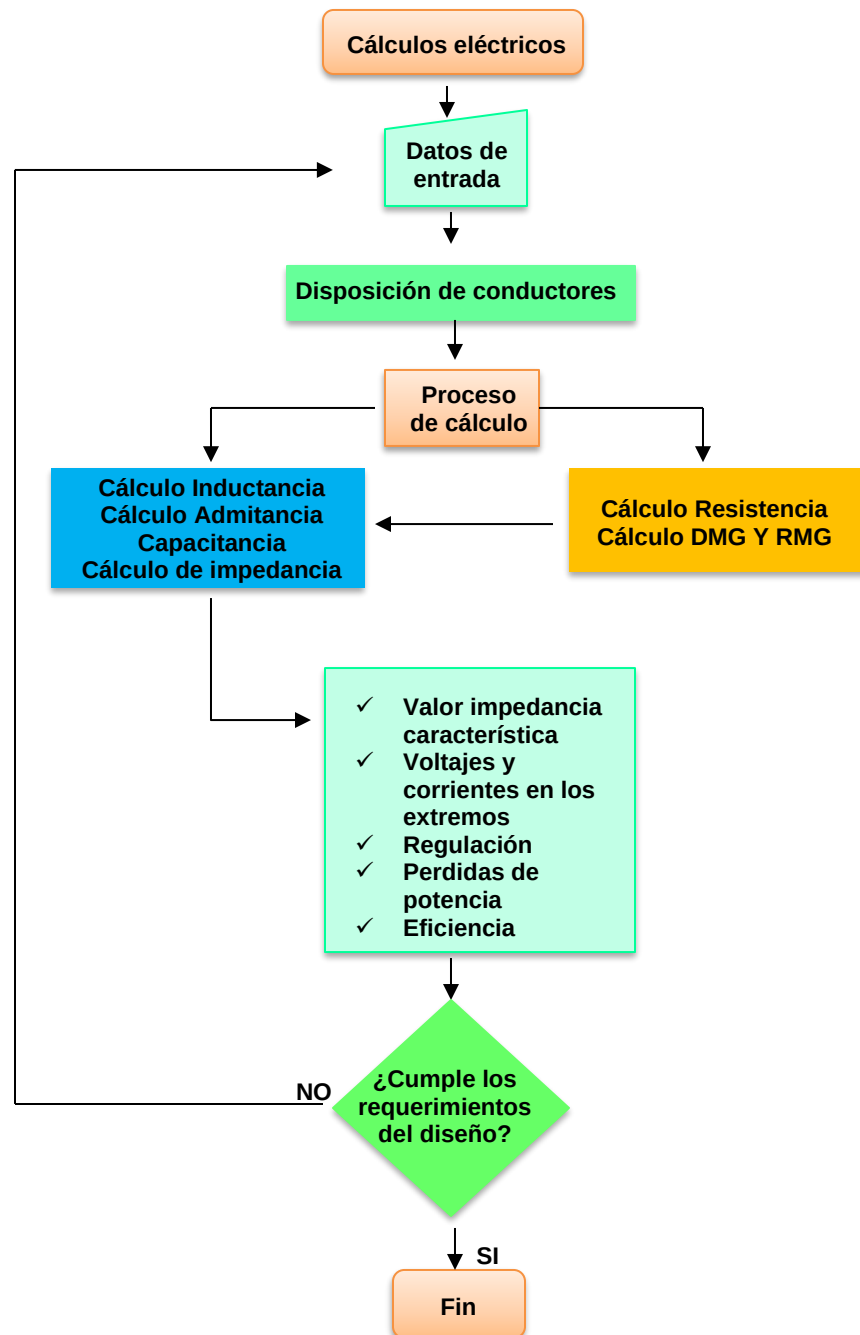
**Ilustración 12. Algoritmo para los cálculos del software**



#### 4.1 Algoritmo para el cálculo eléctrico

Para el cálculo eléctrico se deben ingresar las distancias de los conductores según la configuración que se eligió, así mismo se hallan las distancias medias geométricas del circuito y las características eléctricas necesarias para el diseño de una línea eléctrica-

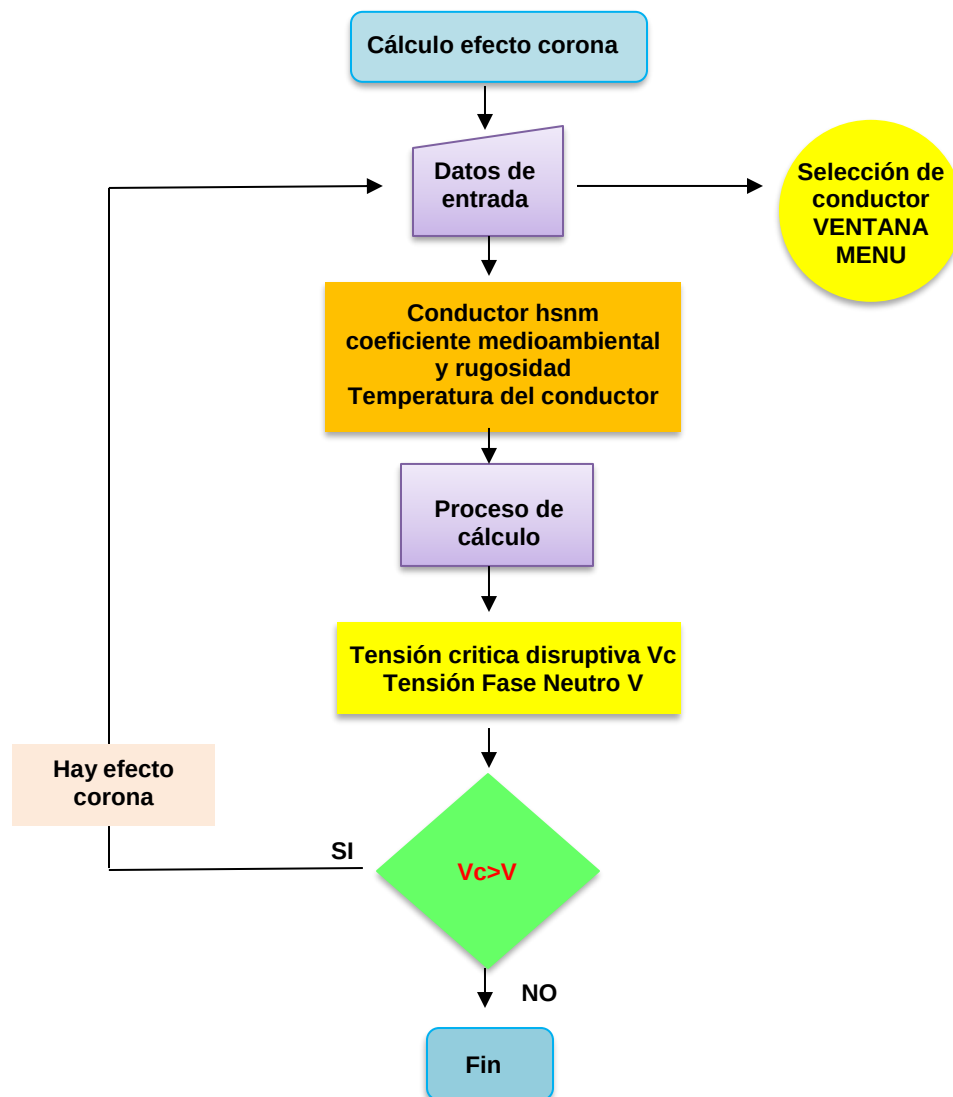
**Ilustración 13. Algoritmo para el cálculo eléctrico**



## 4.2 Algoritmo para cálculo efecto corona

Para el cálculo de efecto corona se deben ingresar los datos iniciales, una vez ingresados inicia el proceso de cálculos respecto al coeficiente medio ambiental y de rugosidad, comprobamos si hay efecto corona si la  $V_c < V$  entonces se debe hacer el cálculo para otro conductor, si por el contrario no hay efecto corona se finaliza el proceso.

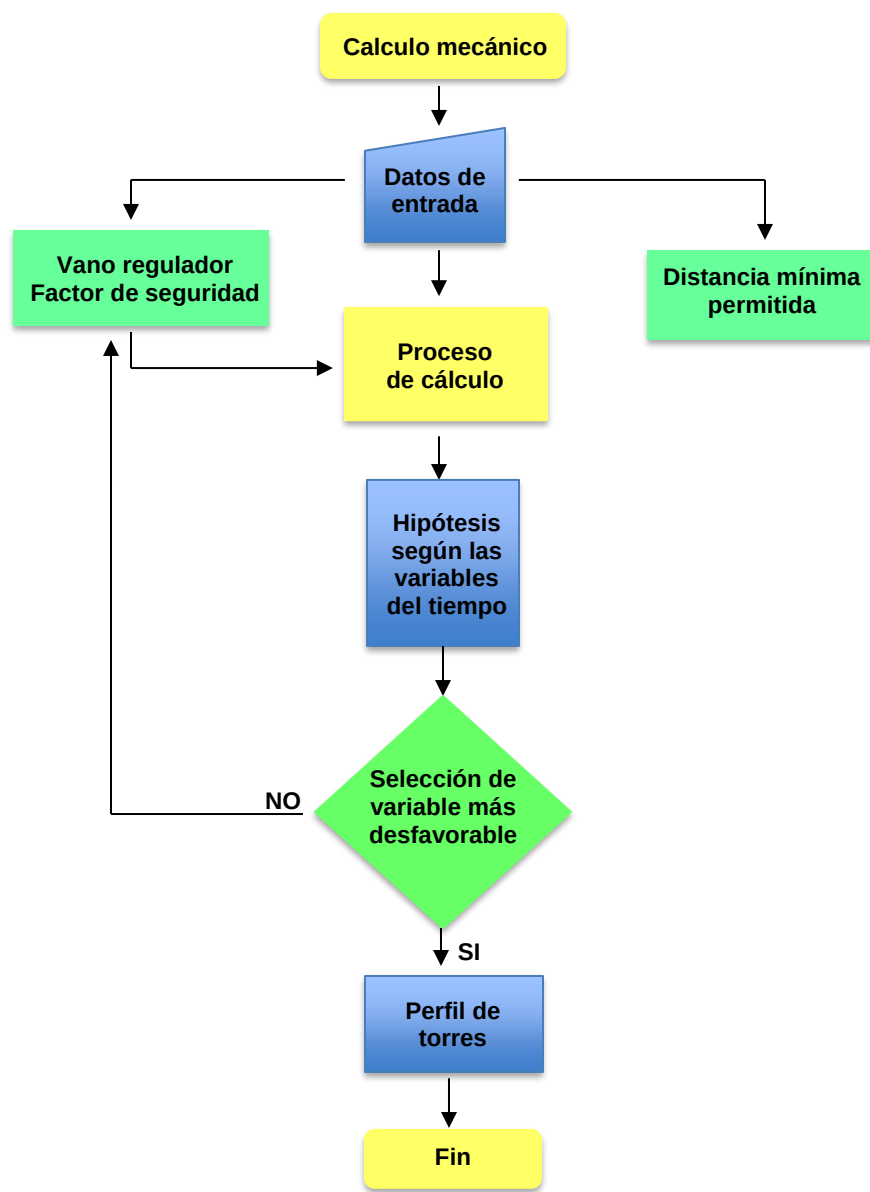
Ilustración 14. Algoritmo para calculo efecto corona



### 4.3 Algoritmo para el cálculo mecánico

El proceso para los cálculos mecánicos inicia cuando se suministran los datos de entrada, seguido el programa realiza los cálculos para cuatro hipótesis que tienen características medioambientales que son extraídas del lugar por donde pasa la línea por medio de la ecuación de cambio de estado, una vez realizado estos cálculos se determina la condición más desfavorable de la línea.

*Ilustración 15. Algoritmo para cálculo mecánico*

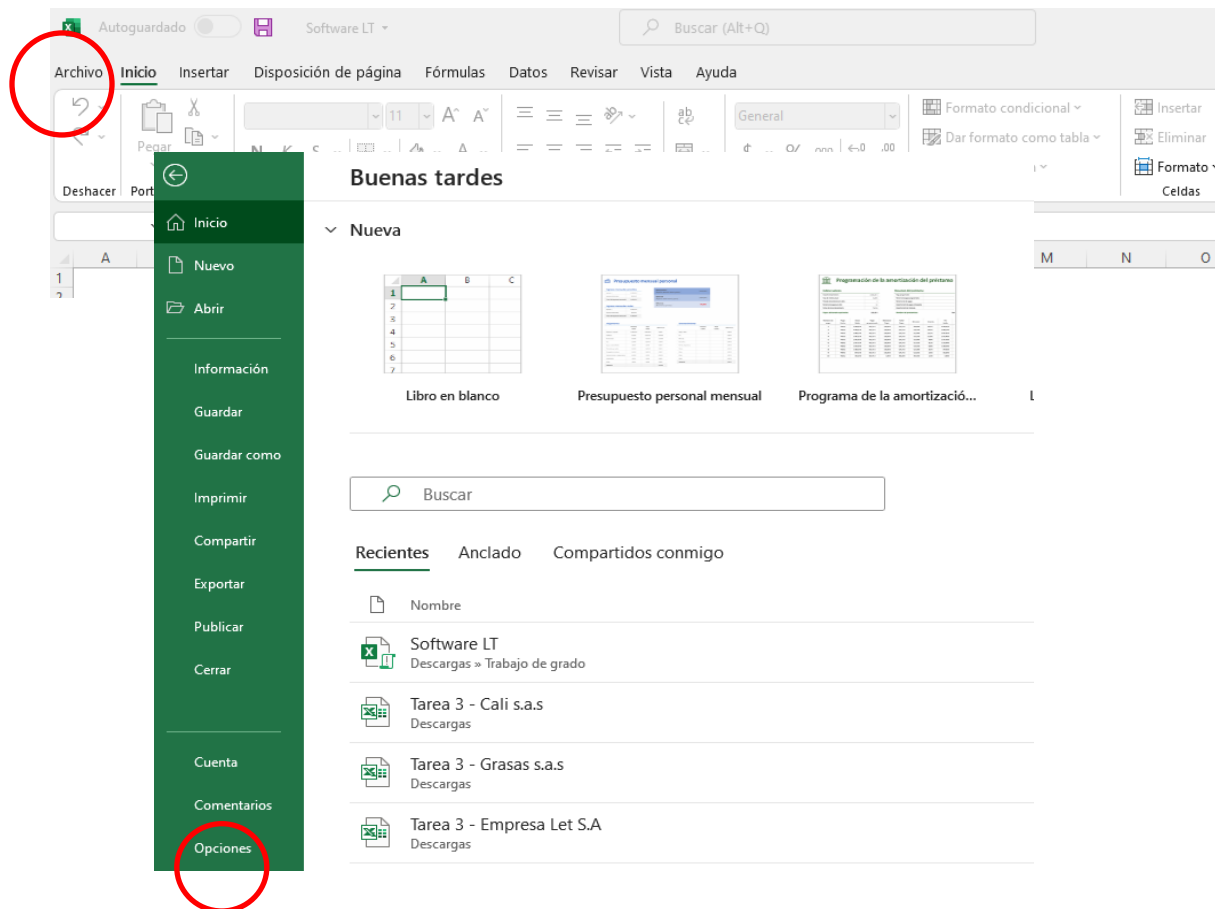


## 4.4 Funcionamiento del Software

El software se desarrolló en la herramienta de Microsoft Excel con un lenguaje de programación VBA (Visual Basic para Aplicaciones) para el correcto uso la herramienta deberá tener activo complementos necesarios como el 'complemento solver' que se activa mediante los siguientes pasos:

1. Vaya archivo, seguido se desplegará una ventana y elija la función opciones

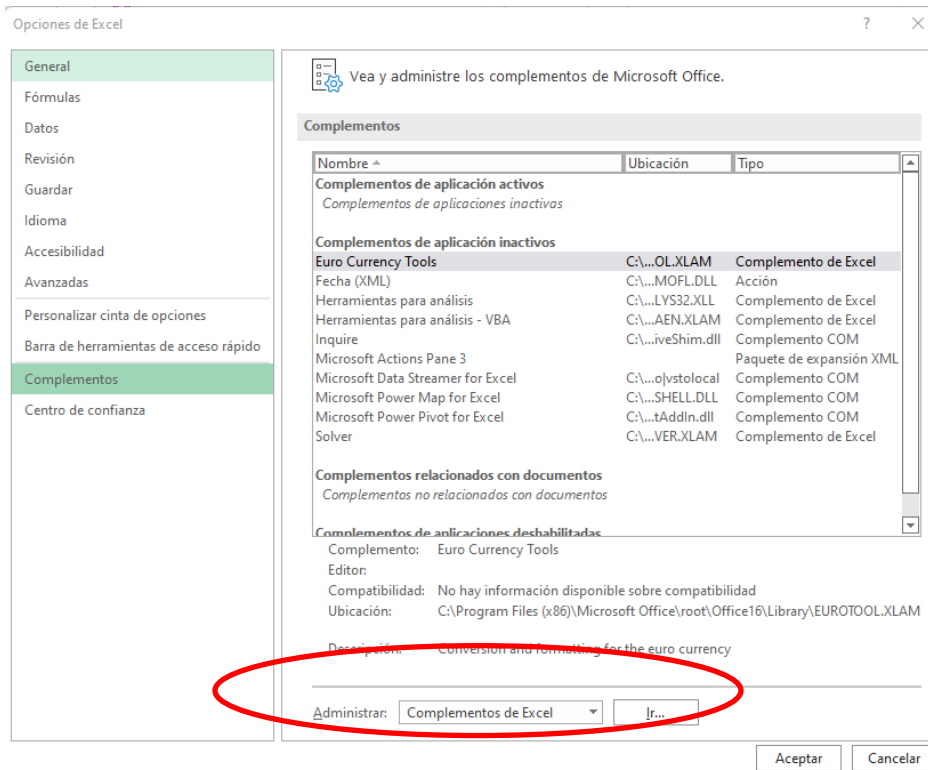
**Ilustración 16. Activación complementos del software**



Fuente: Excel201

- Haga clic en complementos y vaya a la opción administrar complementos de Excel

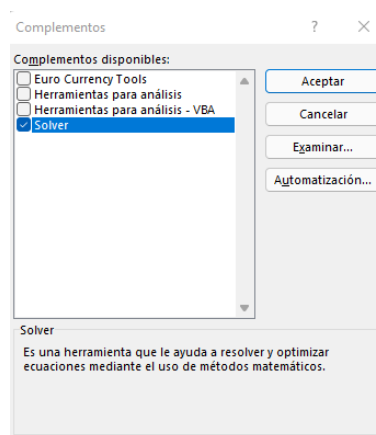
### ***Ilustración 17. Complementos de Excel***



**Fuente: Excel2016**

- Hacer clic en ir y se abrirá una ventana con los complementos, active la casilla solver y en aceptar guarde los cambios.

### ***Ilustración 18. Complemento solver***



**Fuente: Excel2016**

## 4.5 Inicio del software

El programa inicia en la hoja menú que es la interfaz donde se van a suministrar los datos de entrada como lo son: generalidades de la línea o información, numero de circuitos y tipo de circuitos según sus haces, los elementos climáticos de la zona por donde pasa el tendido de la línea, requerido para los cálculos mecánicos y el tipo de conductor.

En el programa las casillas para ingresar los datos anteriormente nombrados estarán en color verde.

**Ilustración 19. Interfaz del programa**

| CÁLCULOS ELÉCTRICOS            |                         | CÁLCULOS MECÁNICOS |                          | EFECTO CORONA                          |     |
|--------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------------------------|-----|
| <b>SELECCIÓN DEL CONDUCTOR</b> |                         |                    |                          | <b>GENERALIDADES</b>                   |     |
| TIPO                           | ACSR                    |                    | Potencia                 | [MW]                                   | 100 |
| CODIGO                         | 397.5 kcmil 26/7. l.bis |                    | Factor de potencia       | -                                      | 0,9 |
| <b>DATOS DEL CONDUCTOR</b>     |                         |                    |                          | <b>ELEMENTOS CLIMÁTICOS DE LA ZONA</b> |     |
| Calibre                        | [AWG/kcmil]             | 397,50             | T <sub>máx</sub> [°C]    | 75                                     |     |
| Diámetro                       | [mm]                    | 19,89              | T <sub>prom</sub> [°C]   | 35                                     |     |
| Radio                          | [mm]                    | 9,945              | T <sub>min</sub> [°C]    | 18                                     |     |
| Área                           | [mm²]                   | 201,41             | T <sub>coind</sub> [°C]  | 35                                     |     |
| RMG                            | [mm]                    | 8,07               | V <sub>máx</sub> [km/h]  | 100                                    |     |
| Peso Total                     | [kg/km]                 | 815                | V <sub>prom</sub> [km/h] | 40                                     |     |
| Rotura                         | [kg-f]                  | 7386               |                          |                                        |     |
| Resistencia DC                 | [Ω/km]                  | 0,14               |                          |                                        |     |
| Resistencia AC                 | [Ω/km]                  | 0,171              |                          |                                        |     |
| Corriente nominal              | [A]                     | 589                |                          |                                        |     |
| Corriente de corto             | [kA]                    | 30,2               |                          |                                        |     |

| TIPO DE LÍNEA     |              |
|-------------------|--------------|
| No Circuitos      | 2            |
| Tipo de circuitos | Haz sencillo |

| TIPO DE CABLE |  |
|---------------|--|
| AAAC          |  |
| ACSR-AW       |  |
| ACAR          |  |
| ACSR          |  |
| AAC           |  |

| ESTRUCTURAS                |             |
|----------------------------|-------------|
| <b>TIPO DE ESTRUCTURAS</b> |             |
| Estructuras                | TS-012      |
| Vano regulador             | 300,00      |
| Vano viento                | 300         |
| Vano peso                  | 360         |
| Tipo Terreno               | B           |
| Ángulo θ                   | 45°         |
| F. Vertical                | 34,504      |
| F. Longitudinal            | Fl 0        |
| F. Transversal             | Ft 55,138   |
| F. actuante                | Fa 65,044   |
| Verificación de estructura | 0,282799727 |
| Cumple                     | SI          |
| Perfil de estructuras      | Seis apoyos |

| TIPO DE TERRENO                                                                                |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| B                                                                                              |  |
| Áreas urbanas y suburbanas, áreas bien arboladas                                               |  |
| C                                                                                              |  |
| Terrenos planos, campo abierto, granjas, pastizales expuestas al viento.                       |  |
| D                                                                                              |  |
| Áreas planas sin obstáculos y directamente expuestas a vientos provenientes de cuerpos de agua |  |

| NOTA                                                                                                                           |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Para ejecutar la macro se deben rellenar las casillas que estan de color verde, para la selección del conductor hay una amplia |  |

| NOTA                                                                                                                                                                                          |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Para la verificación de la estructura es importante rellenar las casillas que estan en color verde y elegir el tipo de terreno, los calculos se realizaran en condiciones de hipotesis normal |  |


Fuente: Excel2016

## 4.6 Selección del conductor

En la selección del conductor el programa tiene un banco de información con diferentes tipos de cables de aluminio desnudos utilizados para transmisión y distribución de energía

eléctrica principalmente en líneas aéreas. En la interfaz en la parte de la selección del conductor hay una lista desplegable con los tipos y códigos según su tipo.

***Ilustración 20. Selección del conductor***

| SELECCIÓN DEL CONDUCTOR |                        |        |
|-------------------------|------------------------|--------|
| TIPO                    | ACSR                   |        |
| CODIGO                  | 397.5 kcmil 26/7. Ibis |        |
| DATOS DEL CONDUCTOR     |                        |        |
| Calibre                 | [AWG/kcmil]            | 397,50 |
| Diámetro                | [mm]                   | 19,89  |
| Radio                   | [mm]                   | 9,945  |
| Área                    | [mm^2]                 | 201,41 |
| RMG                     | [mm]                   | 8,07   |
| Peso Total              | [kg/km]                | 815    |
| Rotura                  | [kg-f]                 | 7386   |
| Resistencia DC          | [Ω/km]                 | 0,14   |
| Resistencia AC          | [Ω/km]                 | 0,171  |
| Corriente nominal       | [A]                    | 589    |
| Corriente de corto      | [kA]                   | 30,2   |

**Fuente: Excel2016**

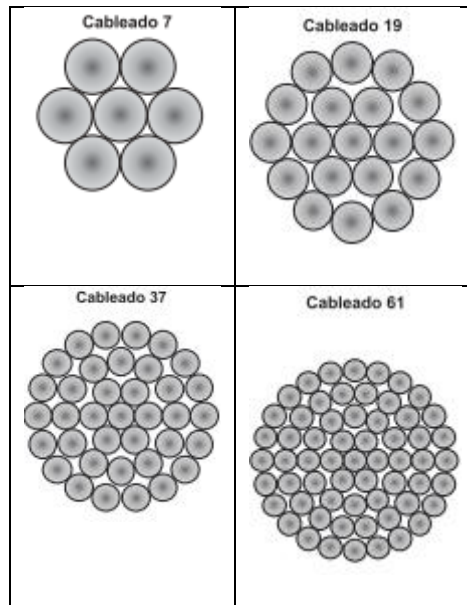
### **Tipos de conductores**

Toda la información respecto a los tipos de conductores implementados fue extraída de los catálogos de Centelsa.

#### **4.6.1 Conductores AAC**

Es un tipo de conductor se usan en líneas de transmisión y líneas de distribución en tramos cortos, los conductores AAC están contruidos de alambres de aluminio 1350-H19 cableados concéntricamente. (Centelsa, 2022)

**Ilustración 21. Número de alambres en conductor AAC**

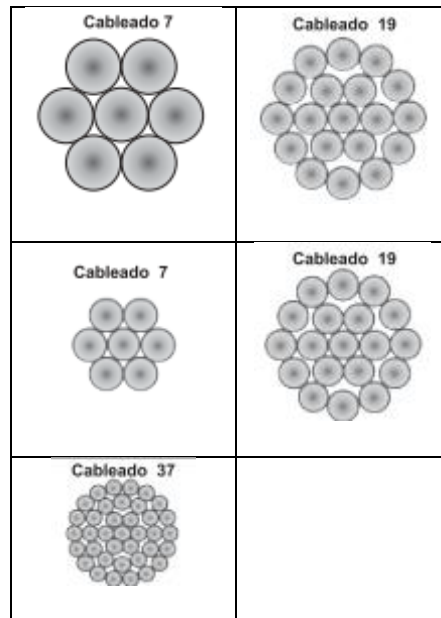


**Fuente: (Centelsa, 2022)**

#### **4.6.2 Conductores AAAC**

Es un tipo de conductor que se usa en líneas de transmisión y líneas de distribución, también es usado como neutro portante para cables de distribución aérea tipo multiplex, los conductores AAAC están contruidos de aleación de aluminio 6201 T81 cableado concéntrico. (Centelsa, 2022)

**Ilustración 22. Número de alambres en conductor AAAC**

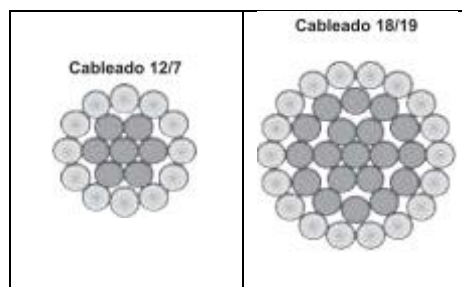


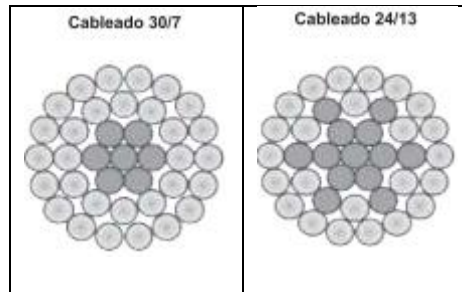
Fuente: (Centelsa, 2022)

#### 4.6.3 Conductores ACAR

Es un tipo de conductor usado en líneas aéreas de transmisión y distribución de energía en tramos largos, está construido de alambres de aluminio 1350 H19, cableados concéntricamente alrededor de un núcleo de aluminio 6201 T81(Centelsa, 2022)

**Ilustración 23. Número de alambres en conductor ACAR**



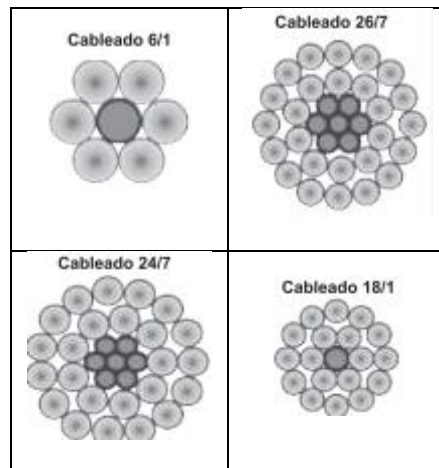


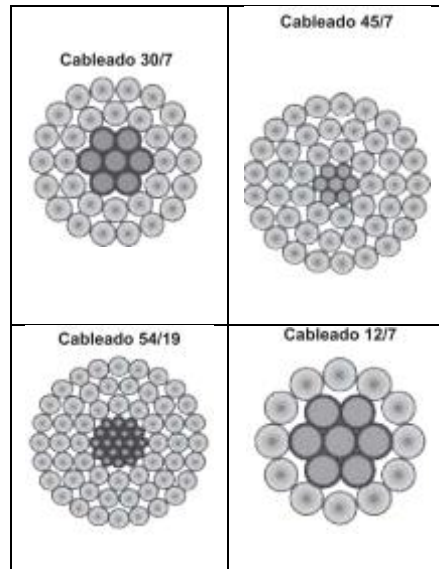
Fuente: (Centelsa, 2022)

#### 4.6.4 Conductores ACSR

Es un tipo de conductor usado en líneas aéreas de transmisión y distribución de energía, también son usados como neutro portante para cables de distribución aérea tipo multiplex, los conductores ACSR están contruidos de alambres de aluminio 1350H19, cableados concéntricamente alrededor de un núcleo de acero recubierto de zinc clase A. (Centelsa, 2022)

***Ilustración 24. Número de alambres en conductor ACSR***



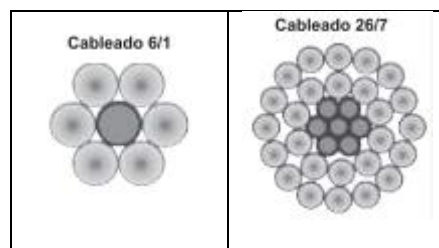


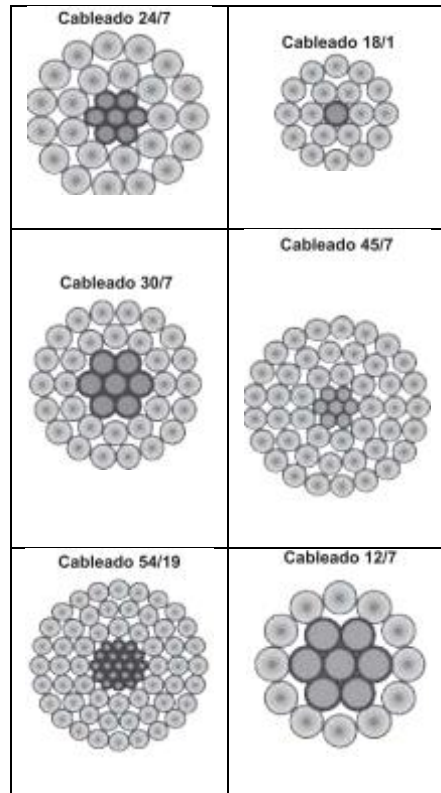
Fuente: (Centelsa, 2022)

#### 4.6.5 Conductores ACSR/AW

Es un tipo de conductor usado en líneas aéreas de transmisión y distribución de energía, también son usados como neutro portante para cables de distribución aérea tipo multiplex, los conductores ACSR están contruidos de alambres de aluminio 1350H19, cableados concéntricamente alrededor de un núcleo de acero recubierto de zinc clase A. (Centelsa, 2022)

**Ilustración 25. Número de alambres en conductor ACSR/AW**





Fuente: (Centelsa, 2022)

#### 4.7 Elementos climáticos

La zona por donde pasa el tendido de la línea eléctrica normalmente tiene cambios climáticos al variar su temperatura y viento, estos elementos son requeridos como datos de entrada en la interfaz para los cálculos mecánicos en la interfaz como se puede ver en

**Ilustración 26**

**Ilustración 26. Elementos climáticos**

| ELEMENTOS CLIMATICOS DE LA ZONA |     |
|---------------------------------|-----|
| Tmax [°C]                       | 75  |
| Tprom [°C]                      | 35  |
| Tmin[°C]                        | 18  |
| Tcoind[°C]                      | 35  |
| Vvmax[km/h]                     | 100 |
| Vvprom[km/h]                    | 40  |

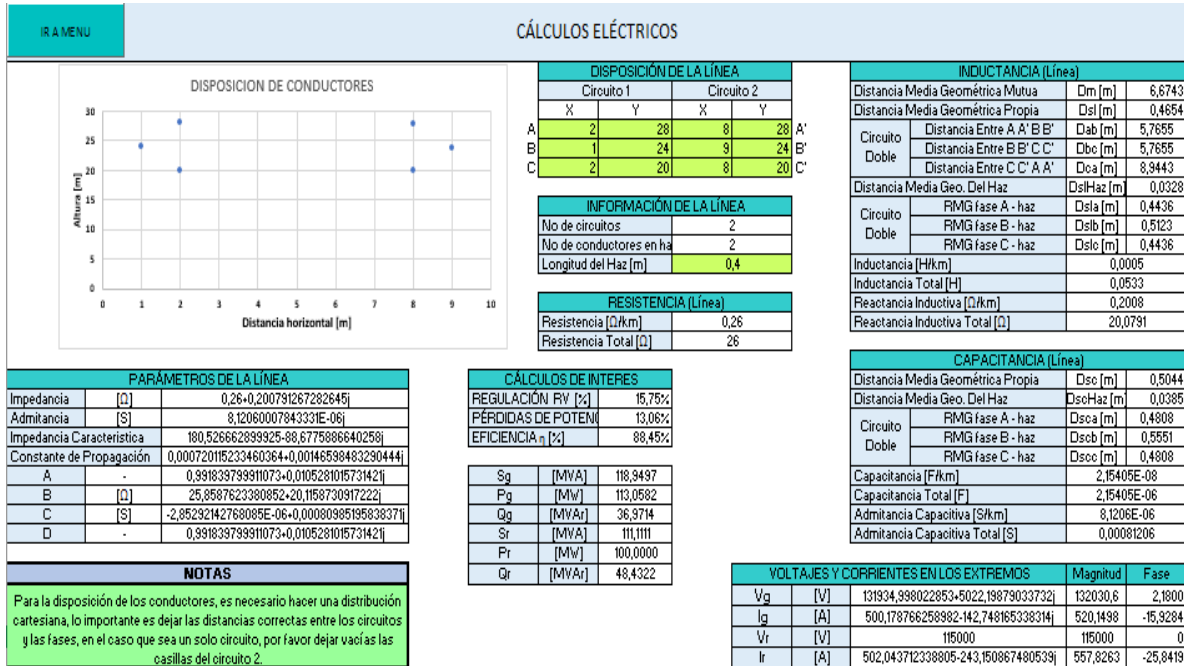
**Fuente: Excel2016**

#### **4.8 Cálculos eléctricos**

Una vez se ingresan los datos de entrada nombrados anteriormente se va a ir a la hoja de cálculos eléctricos seleccionando el botón en la interfaz, en la hoja de cálculos eléctricos el programa va a pedir que se ingresen en las casillas de color verde las distancias de los conductores según la estructura que se va a utilizar y la longitud del haz, si se tiene una configuración con varios haces. En la parte izquierda se va a evidenciar por medio de una gráfica la disposición de los conductores, cargados todos los datos anteriores el programa calculara con base a ellos todos los parámetros eléctricos necesarios para construir la línea. Ver la hoja en la

**Ilustración 27**

## Ilustración 27 Hoja de cálculos eléctricos



Fuente: Excel2016

### 4.9 Cálculos mecánicos

Para ir a la hoja de los cálculos mecánicos se va a dar clic al botón en la interfaz de menú, para los cálculos es necesario ingresar tres datos de entrada como; Factor de seguridad, Vano regulador y la distancia mínima permitida en la zona si la hay. Una vez se cargan los datos deberá actualizar la hoja dando clic en el botón Hipótesis y luego aceptar cuatro veces en las ventanas emergentes para que el programa calcule para cuatro hipótesis de carga las flechas máxima, mínima, distancia entre aisladores, distancias mínimas entre fases verticales y horizontales, distancia mínima del terreno y la altura del conductor más bajo de la torre en la condición más desfavorable. Ver **Ilustración 28**

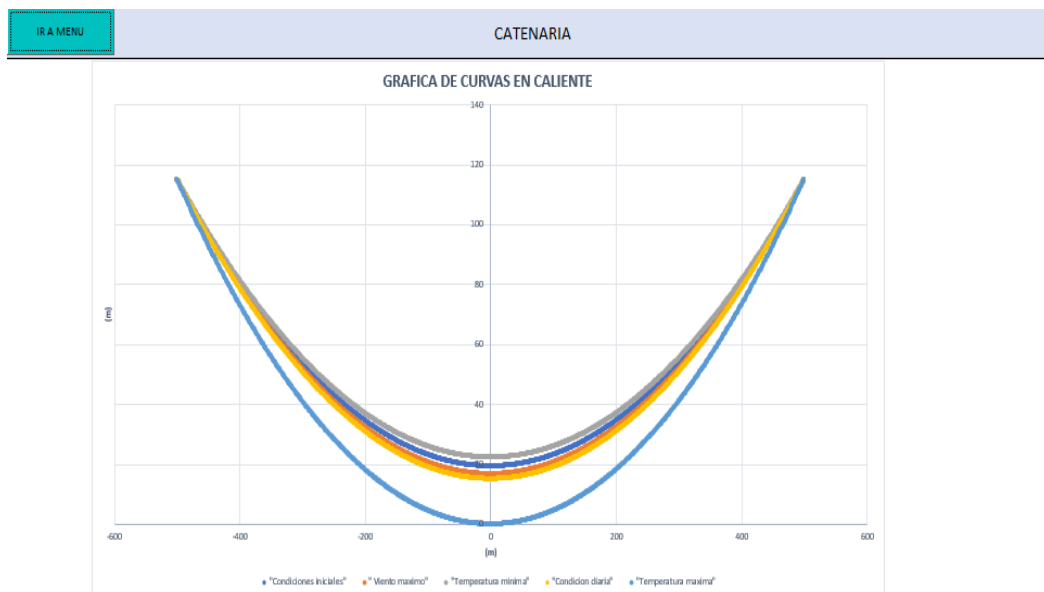
## Ilustración 28. Cálculos mecánicos

| IR A MENÚ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  | CÁLCULOS MECÁNICOS                                                                                                                                                                                                                                                  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DATOS DE FABRICANTE</b><br>Carga de Rotura $T$ [kg] 9773,00<br>Carga de Rotura Apte $z$ [Kg/mm <sup>2</sup> ] 31,88<br>Carga de Rotura Real $Tr$ [kg] 1954,60<br>Carga de Rotura Real Apte $tr$ [Kg/mm <sup>2</sup> ] 6,38<br>Peso $P$ [Kg/m] 1,16<br>Peso Específico o Apte $Pa$ [Kg/m <sup>3</sup> mm <sup>2</sup> ] 0,0038<br>Parámetro $h$ [m] 1685,00<br>Factor Seg. $Fs$ - 5<br>Vano Regulador $ar$ [m] 300<br>Modulo de Elasticidad $E$ [kg/mm <sup>2</sup> ] 6300,00<br>Coeficiente de Dilatación $\alpha$ [1/°C] 2,30E-05<br>Temperatura Nominal $Tn$ [°C] 25,00 |  |  | <b>CATENARIA</b><br>Flecha $f$ [m] 6,68<br>Long. del cable $L$ [m] 300,40                                                                                                                                                                                           |  | ¿Tiene distancia mínima permitida en la zona? <b>NO</b><br>Valor 20                                                                                                                                                                                                               | <b>HIPÓTESIS</b> |                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>SELECCIÓN DE LA CONDICIÓN MÁS DESFAVORABLE</b><br>Flecha Máxima Inclinada $f_{max}$ [m] 8,6976949<br>Flecha Máxima Vertical $f_{max}$ [m] 8,6976949<br>longitud de los aisladores $Dais$ [m] 1,633333333<br>Distancia mínima entre fases (Horizontal) [m] 2,695300251<br>Distancia mínima entre fases (Vertical) [m] 4,747525025<br>Distancia mínima al Terreno $D_{min}$ [m] 6,833333333<br>Altura del conductor más bajo de la Torre [m] 17,16436157                                                                                                                    |  |  | <b>HIPÓTESIS</b><br>Viento Máximo<br>Temp [°C] 16 Vel [km/h] 120<br>Carga del Viento $W_h$ [kg/m] 1,4636<br>Carga del Conductor $W_c$ [kg/m] 1,16<br>Carga Total $W_t$ [kg/m] 1,8676<br>Coeficiente de sobre carga $M_a$ 1,6100                                     |  | Temperatura Mínima<br>Temp [°C] 15 Vel [km/h] 0<br>Carga del Viento $W_h$ [kg/m] 0<br>Carga del Conductor $W_c$ [kg/m] 1,16<br>Carga Total $W_t$ [kg/m] 1,16<br>Coeficiente de sobre carga $M_a$ 1                                                                                |                  | <b>Ecuación de Estado A</b><br>Constante A 13,89<br>Constante B 2272,686<br>Carga de Rotura apte $ra$ 9,80<br>Carga de Rotura $Ta$ 3002,98<br><b>Catenaria A</b><br>Parámetro $ha$ 1607,973<br>Flecha $f$ 7,001459<br>Longitud del cable $L$ 300,4353       |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  | <b>Temperatura Máxima</b><br>Temp [°C] 75 Vel [km/h] 0<br>Carga del Viento $W_h$ [kg/m] 0<br>Carga del Conductor $W_c$ [kg/m] 1,16<br>Carga Total $W_t$ [kg/m] 1,16<br>Coeficiente de sobre carga $M_a$ 1                                                           |  | <b>Condición Diaria de Operación</b><br>Temp [°C] 25 Vel [km/h] 60<br>Carga del Viento $W_h$ [kg/m] 0,365304<br>Carga del Conductor $W_c$ [kg/m] 1,16<br>Carga Total $W_t$ [kg/m] 1,216341127<br>Coeficiente de sobre carga $M_a$ 1,048563937                                     |                  | <b>GRÁFICA CATENARIA</b>                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  | <b>Ecuación de Estado B</b><br>Constante A 0,4358841<br>Constante B 338,27916<br>Carga de Rotura apte $rb$ 6,8063013<br>Carga de Rotura $Tb$ 2086,4955<br><b>Catenaria B</b><br>Parámetro $hb$ 1798,703<br>Flecha $f$ 6,2581323<br>Longitud del cable $L$ 300,34784 |  | <b>Ecuación de Estado C</b><br>Constante A 2,772807849<br>Constante B 408,944947<br>Carga de Rotura apte $rc$ 6,603975743<br>Carga de Rotura $Tc$ 2024,471878<br><b>Catenaria C</b><br>Parámetro $hc$ 1664,334826<br>Flecha $f$ 6,763789687<br>Longitud del cable $L$ 300,4062713 |                  | <b>Ecuación de Estado D</b><br>Constante A 9,1899<br>Constante B 338,2792<br>Carga de Rotura apte $rd$ 4,893682<br>Carga de Rotura $Td$ 1502,076<br><b>Catenaria D</b><br>Parámetro $hd$ 1294,893<br>Flecha $f$ 8,697695<br>Longitud del cable $L$ 300,6714 |
| <b>NOTAS</b><br>Los cálculos mecánicos se realizan al actualizar la hoja en el botón "Hipótesis", luego de haber llenado correctamente el valor de vano regular y el factor de seguridad. Los cálculos se realizan partiendo de las condiciones iniciales de datos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                     |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                  |                                                                                                                                                                                                                                                             |

Fuente: Excel2016

En la ventana de los cálculos mecánicos, el programa también permite visualizar las curvas en caliente de la catenaria en todas las hipótesis de carga de los datos de entrada, para observarlas se va a dar clic en el botón grafica catenaria. Ver **Ilustración 29**

## Ilustración 29. Interfaz gráfica de la catenaria



También se tendrá a disposición en una hoja de cálculo la información de efecto corona que tiene la línea a partir de factores climáticos como; la altura sobre nivel del mar, coeficiente de rugosidad y medioambiental del conductor.

### Ilustración 30. Calculo efecto corona

IR A MENU

EFECTO CORONA

| DATOS INICIALES                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| Altura sobre el nivel del mar ( <b>h<sub>snm</sub></b> ) | 1300       |
| Coeficiente de Rugosidad <b>mc</b>                       | 0,83       |
| Coeficiente Medioambiental <b>mt</b>                     | 1          |
| Temperatura del conductor <b>t</b>                       | 28         |
| Presión Barométrica <b>h</b>                             | 645,527598 |
| Densidad del Aire <b>δ</b>                               | 0,84090156 |

| VOLTAJE Y PERDIDAS                        |             |
|-------------------------------------------|-------------|
| Tensión crítica disruptiva [kV]           | 70,12       |
| Tensión crítica disruptiva corregida [kV] | 58,19990825 |
| Tensión Nominal Fase Neutro [kV]          | 66,39528096 |
| ¿Presenta Efecto Corona?                  |             |
| NO                                        |             |
| Perdidas por Efecto Corona [Kw/km]        | No Presenta |

#### 4.10 Selección de estructuras

Para la selección de estructuras el programa tiene información de diferentes tipos de estructuras utilizadas para el diseño de líneas de energía en alta tensión, para iniciar la verificación que garantiza el cumplimiento de las condiciones técnicas exigidas para la capacidad que tienen las estructuras de soportar la sobrecarga de conductores y elementos de sujeción, se debe ingresar en las casillas de color verde; el tipo de estructura, ángulo y el tipo de terreno según la **Tabla 5. Categorías norma ASCE 74-2009**, todos estos datos según lo requiera el diseño.

El programa realizara el cálculo de las cargas que ejercen los elementos sobre las estructuras, que tienen tres componentes; verticales, longitudinales y transversales, a partir de los valores ingresados el programa nos indicara si la estructura seleccionada cumple.

**Ilustración 31. Selección de estructuras**

| TIPO DE ESTRUCTURAS        |             |
|----------------------------|-------------|
| Estructuras                | TT-011      |
| Vano regulador             | 300,00      |
| Vano viento                | 300         |
| Vano peso                  | 360         |
| Tipo Terreno               | B           |
| Ángulo $\theta$            | 90°         |
| F. Vertical                | 429,832     |
| F. Longitudinal            | FI 0        |
| F. Transversal             | Ft 64,359   |
| F. actuante                | Fa 434,624  |
| Verificacion de estructura | 1,889669182 |
| Cumple                     | SI          |
| Perfil de estructuras      | Seis apoyos |
| No de estructuras          | Seis apoyos |

El programa tiene una lista desplegable de estructuras para el diseño y un banco de información de cada estructura que se puede modificar para beneficio del usuario:

**Ilustración 32. Tipo de estructura**

| ESTRUCTURAS         |                  |
|---------------------|------------------|
| TIPO DE ESTRUCTURAS |                  |
| Estructuras         | TS-021           |
| Vano regulador      | TS-011<br>TS-012 |
| Vano viento         | TS-021           |
| Vano peso           | TS-022<br>TR-021 |
| Tipo Terreno        | TT-011           |
| Ángulo $\Theta$     | 90°              |

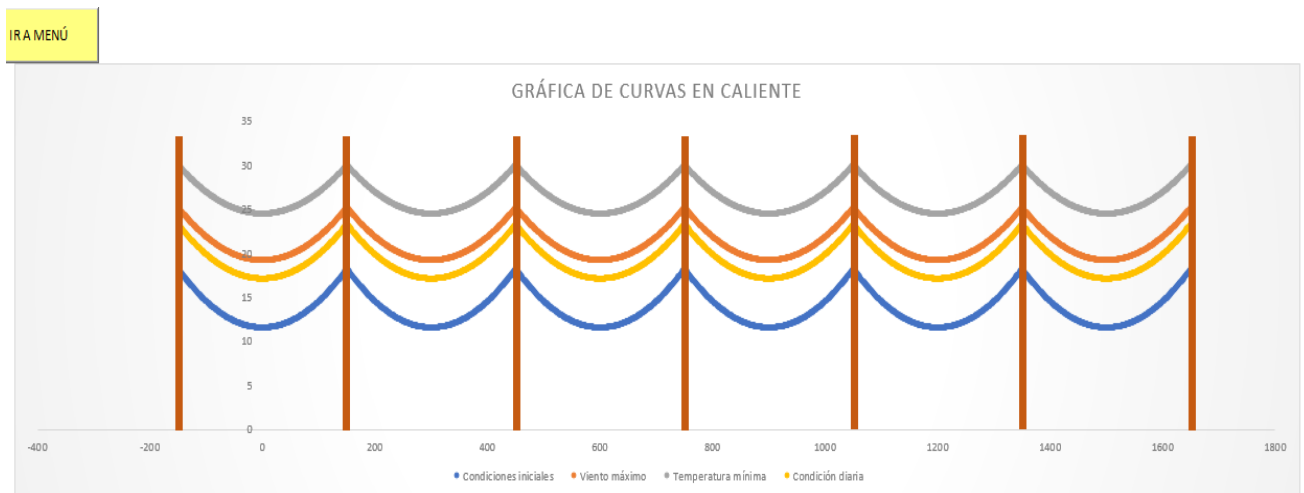
En la ventana de menú al dar clic en el botón de estructuras, se encontrará el banco de información de las estructuras, que puede ser modificado cambiando los valores de las casillas color naranja.

**Ilustración 33. Banco de información de estructuras**

| IR A MENÚ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                   |                                                                                    | AISLADORES             |                   | ESTRUCTURA TERMINAL |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|----|----------|----------|----------------------|--|--|----|----------|----------|--|--|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|-----------------|-------------------|-------|----|---|---|----|----------|----------|----|---|---|----|----------|----------|----|---|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|-----------------|-------------------|-------|----|----------|----------|----|----------|----------|----|----------|----------|----------------------|--|--|----|----------|----------|--|--|--|
| ESTRUCTURAS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                   |                                                                                    |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| CTO SIMPLE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                   | CARACTERÍSTICAS                                                                    |                        | CTO DOBLE         |                     | CARACTERÍSTICAS GENERALES                                                                                     |          | CTO SIMPLE |                  | CARACTERÍSTICAS GENERALES                                                                                                                |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   | Voltaje de línea<br>115kv                                                          |                        |                   |                     | Voltaje de línea<br>115kv                                                                                     |          |            |                  | Voltaje de línea<br>230kv                                                                                                                |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   | Carga de rotura<br>200                                                             |                        |                   |                     | Carga de rotura<br>200                                                                                        |          |            |                  | Carga de rotura<br>230                                                                                                                   |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   | Funcion de la línea<br>Torre de suspension                                         |                        |                   |                     | Funcion de la línea<br>Torre de suspension                                                                    |          |            |                  | Funcion de la línea<br>Torre de suspension                                                                                               |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   | Disposicion d elos circuitos<br>Triangular vertical                                |                        |                   |                     | Disposicion d elos circuitos<br>Triangular vertical                                                           |          |            |                  | Disposicion d elos circuitos<br>Horizontal                                                                                               |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   | Formato de la torre<br>Tronco piramidal de celosia<br>doble con extesion tipo pata |                        |                   |                     | Formato de la torre<br>Tronco piramidal de celosia doble<br>con elementos redudantes y<br>extension tipo pata |          |            |                  | Formato de la torre<br>Tronco piramidal de celosia doble<br>con elementos redudante cabeza<br>tipo cara de gato y extension tipo<br>pata |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                   | TS-011                                                                             |                        |                   |                     | TS-021                                                                                                        |          |            |                  | TS-012                                                                                                                                   |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| HIPOTESIS NORMAL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                   |                                                                                    | Angulo def 1,570796327 |                   |                     | HIPOTESIS NORMAL                                                                                              |          |            | HIPOTESIS NORMAL |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| <table><tr><th>Puntos de carga</th><th>Cargas verticales</th><th>Total</th></tr><tr><td>P1</td><td>439,0067</td><td>439,0067</td></tr><tr><td>P2</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>P3</td><td>439,0067</td><td>439,0067</td></tr><tr><td colspan="3">Cargas Transversales</td></tr><tr><td>P1</td><td>100,4863</td><td>100,4863</td></tr></table> |                   |                                                                                    | Puntos de carga        | Cargas verticales | Total               | P1                                                                                                            | 439,0067 | 439,0067   | P2               | 0                                                                                                                                        | 0 | P3 | 439,0067 | 439,0067 | Cargas Transversales |  |  | P1 | 100,4863 | 100,4863 |  |  |  | <table><tr><th>Puntos de carga</th><th>Cargas verticales</th><th>Total</th></tr><tr><td>P1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>P2</td><td>439,0067</td><td>439,0067</td></tr><tr><td>P3</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>P4</td><td>439,0067</td><td>439,0067</td></tr><tr><td>P5</td><td>0</td><td>0</td></tr></table> |  |  | Puntos de carga | Cargas verticales | Total | P1 | 0 | 0 | P2 | 439,0067 | 439,0067 | P3 | 0 | 0 | P4 | 439,0067 | 439,0067 | P5 | 0 | 0 | <table><tr><th>Puntos de carga</th><th>Cargas verticales</th><th>Total</th></tr><tr><td>P1</td><td>439,0067</td><td>439,0067</td></tr><tr><td>P2</td><td>439,0067</td><td>439,0067</td></tr><tr><td>P3</td><td>439,0067</td><td>439,0067</td></tr><tr><td colspan="3">Cargas Transversales</td></tr><tr><td>P1</td><td>100,4863</td><td>100,4863</td></tr></table> |  |  | Puntos de carga | Cargas verticales | Total | P1 | 439,0067 | 439,0067 | P2 | 439,0067 | 439,0067 | P3 | 439,0067 | 439,0067 | Cargas Transversales |  |  | P1 | 100,4863 | 100,4863 |  |  |  |
| Puntos de carga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Cargas verticales | Total                                                                              |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 439,0067          | 439,0067                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0                 | 0                                                                                  |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 439,0067          | 439,0067                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| Cargas Transversales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                   |                                                                                    |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 100,4863          | 100,4863                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| Puntos de carga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Cargas verticales | Total                                                                              |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0                 | 0                                                                                  |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 439,0067          | 439,0067                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0                 | 0                                                                                  |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 439,0067          | 439,0067                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0                 | 0                                                                                  |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| Puntos de carga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Cargas verticales | Total                                                                              |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 439,0067          | 439,0067                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 439,0067          | 439,0067                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 439,0067          | 439,0067                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| Cargas Transversales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                   |                                                                                    |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |
| P1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 100,4863          | 100,4863                                                                           |                        |                   |                     |                                                                                                               |          |            |                  |                                                                                                                                          |   |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |  |  |                 |                   |       |    |   |   |    |          |          |    |   |   |    |          |          |    |   |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |  |  |                 |                   |       |    |          |          |    |          |          |    |          |          |                      |  |  |    |          |          |  |  |  |

- Sí se utiliza una estructura para cambiar la dirección de la red, se debe indicar el ángulo en grados para conocer la dirección respecto al apoyo anterior.
- Se deberá ingresar los datos requeridos en la sección de tipos de estructura de la ventana menú para cada una de las estructuras a utilizar en la línea y verificar si cumple con las condiciones óptimas para el diseño.
- Esta sección del programa solo permite realizar el diseño de una red hasta en máximo 13 apoyos. Según el número de apoyos requeridos para el diseño de la línea el programa permite visualizar el perfil de las estructuras, así como las curvas de la catenaria en todas las condiciones de temperatura, y distancias de las flechas de los conductores gráficamente ver la **Ilustración 34**

**Ilustración 34. Perfil de estructuras**



## Capítulo 5. Resultados de Diseño de línea de 115kV

En este capítulo se va verificar cada sección del programa mediante la formulación de una línea, que transporta una potencia de 100 MVA a una tensión de servicio de 115kV, con una longitud de 80 km ubicada en una zona con clima cálido, y está compuesta por doble circuito con distribución de haz sencillo.

### 5.1 Parámetros de diseño

Características generales del conductor:

**Tabla 7. Características del conductor**

| ITEM                  | DESCRIPCIÓN             |
|-----------------------|-------------------------|
| Conductor             | Peacock                 |
| Tipo                  | ACSR                    |
| Calibre               | 605,00 MCM              |
| Área                  | 306,55                  |
| Diámetro              | 24,21 mm                |
| Peso total            | 1160 kg/km              |
| Tensión de rotura     | 9773 kg-f               |
| Módulo de elasticidad | 6300 kg/mm <sup>2</sup> |

### 5.2 Parámetros meteorológicos

Los parámetros meteorológicos de la línea se definieron a partir de las condiciones climáticas de la zona.

**Tabla 8. Parámetros meteorológicos**

| ITEM                            | DESCRIPCIÓN |
|---------------------------------|-------------|
| Altura sobre el nivel del mar   | 467 m.s.n.m |
| Velocidad de viento diseño      | 120 km/h    |
| Velocidad de viento coincidente | 60 km/h     |
| Temperatura media               | 25 °C       |
| Temperatura máxima              | 36 °C       |
| Temperatura mínima              | 15 °C       |
| Temperatura coincidente         | 16 °C       |

### 5.3 Parámetros electromecánicos

**Tabla 9. Parámetros electromecánicos**

| ITEM                                          | DESCRIPCIÓN |
|-----------------------------------------------|-------------|
| Tensión nominal                               | 115 kV      |
| Número de circuitos                           | 2           |
| Número de haz                                 | 1           |
| Temperatura máxima de operación del conductor | 75 °C       |

### 5.4 Inicio de los cálculos

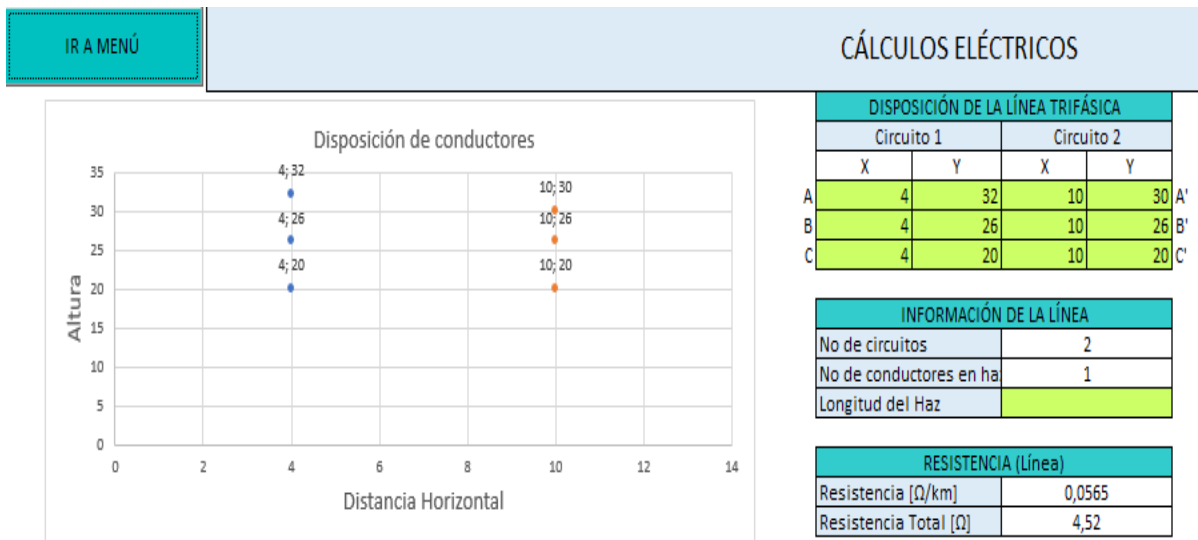
Las características anteriores de la línea se registran inicialmente en la ventana de Menú, como se puede evidenciar en la **Ilustración 35**

**Ilustración 35. Ventana de menú**

| CÁLCULOS ELÉCTRICOS     |                         | CÁLCULOS MECÁNICOS |                                                                                                                                | EFECTO CORONA   |            |
|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------|
| SELECCIÓN DEL CONDUCTOR |                         |                    |                                                                                                                                | GENERALIDADES   |            |
| TIPO                    | ACSR                    |                    | Potencia                                                                                                                       | [MW]            | 100        |
| CODIGO                  | 605 kcmil 24/7. Peacock |                    | Factor de potencia                                                                                                             | -               | 0,9        |
| DATOS DEL CONDUCTOR     |                         |                    |                                                                                                                                | Voltaje nominal | [kV] 115   |
| Calibre                 | [AWG/kcmil]             | 605,00             | Longitud                                                                                                                       | [km]            | 150        |
| Diámetro                | [mm]                    | 24,2               | Potencia aparente                                                                                                              | [MVA]           | 111,111111 |
| Radio                   | [mm]                    | 12,1               | Corriente nominal                                                                                                              | [A]             | 557,826347 |
| Área                    | [mm <sup>2</sup> ]      | 306,55             | ELEMENTOS CLIMÁTICOS DE LA ZONA                                                                                                |                 |            |
| RMG                     | [mm]                    | 9,71               | Tmáx [°C]                                                                                                                      | 75              |            |
| Peso Total              | [kg/km]                 | 1160               | Tprom [°C]                                                                                                                     | 25              |            |
| Rotura                  | [kg-f]                  | 9773               | Tmin[°C]                                                                                                                       | 15              |            |
| Resistencia DC          | [Ω/km]                  | 0,0924             | Tcoind[°C]                                                                                                                     | 16              |            |
| Resistencia AC          | [Ω/km]                  | 0,113              | Vvmáx[km/h]                                                                                                                    | 120             |            |
| Corriente nominal       | [A]                     | 763                | Vvprom[km/h]                                                                                                                   | 60              |            |
| Corriente de corto      | [kA]                    | 46                 |                                                                                                                                |                 |            |
| TIPO DE LÍNEA           |                         |                    |                                                                                                                                | NOTA            |            |
| No Circuitos            | 2                       |                    | Para ejecutar la macro se deben rellenar las casillas que estan de color verde, para la selección del conductor hay una amplia |                 |            |
| Tipo de circuitos       | Haz sencillo            |                    |                                                                                                                                |                 |            |

En la imagen se observa la información de las características generales de la línea cargadas en las casillas de color verde, cargada la información se puede dar inicio a los cálculos eléctricos, el programa tiene una ventana con información del tipo de estructuras para cargar la distribución de los conductores en la ventana de cálculos eléctricos.

### Ilustración 36. Ventana de Cálculos eléctricos



Con base en los datos cargados el programa proporciona los siguientes valores:

| RESISTENCIA (Línea)            |        |
|--------------------------------|--------|
| Resistencia [ $\Omega$ /km]    | 0,0565 |
| Resistencia Total [ $\Omega$ ] | 4,52   |

| PARÁMETROS DE LA LÍNEA    |              |                                             |
|---------------------------|--------------|---------------------------------------------|
| Impedancia                | [ $\Omega$ ] | 0,0565+0,269801722828903j                   |
| Admitancia                | [S]          | 6,07762017881393E-06j                       |
| Impedancia Característica |              | 211,835158573781-21,9425377712307j          |
| Constante de Propagación  |              | 0,000133358410332819+0,00128745363433026j   |
| A                         | -            | 0,981606954395949+0,00383937606895465j      |
| B                         | [ $\Omega$ ] | 8,37105710375409+40,2327155080043j          |
| C                         | [S]          | -1,16959338742438E-06+0,000906047148366655j |
| D                         | -            | 0,981606954395949+0,00383937606895465j      |

| CÁLCULOS DE INTERES         |        |
|-----------------------------|--------|
| REGULACIÓN RV [%]           | 13,59% |
| PÉRDIDAS DE POTENCIA Pp [%] | 4,20%  |
| EFICIENCIA $\eta$ [%]       | 95,97% |

| VOLTAJES Y CORRIENTES EN LOS EXTREMOS |     |                                    | Magnitud   | Fase     |
|---------------------------------------|-----|------------------------------------|------------|----------|
| Vg                                    | [V] | 126647,0792063+18146,2908943951j   | 127940,496 | 8,1540   |
| Ig                                    | [A] | 493,63901312235-130,229489030971j  | 510,528349 | -14,7788 |
| Vr                                    | [V] | 115000                             | 115000     | 0        |
| Ir                                    | [A] | 502,043712338805-243,150867480539j | 557,826347 | -25,8419 |

Con las características del conductor y las condiciones meteorológicas el programa realiza los cálculos mecánicos para el valor de un vano de 300 m, considerando las tensiones horizontales y las flechas para diferentes condiciones de carga de hipótesis.

| SELECCIÓN DE LA CONDICIÓN MÁS DESFAVORABLE         |     |             |
|----------------------------------------------------|-----|-------------|
| Flecha Máxima Inclinada <b>fmax</b>                | [m] | 8,6976949   |
| Flecha Máxima Vertical <b>fmax</b>                 | [m] | 8,6976949   |
| longitud de los aisladores <b>Dais</b>             | [m] | 0,866666667 |
| Distancia mínima entre fases ( <b>Horizontal</b> ) | [m] | 1,890300251 |
| Distancia mínima entre fases ( <b>Vertical</b> )   | [m] | 3,859296869 |
| Distancia mínima al Terreno <b>Dmin</b>            | [m] | 6,066666667 |
| <b>Altura del conductor más bajo de la Torre</b>   | [m] | 15,63102823 |

Los tipos de estructuras han sido seleccionados considerando la distancia mínima de seguridad al suelo, los esfuerzos producidos sobre cada estructura. Las torres básicamente serán de dos tipos; suspensión y retención.

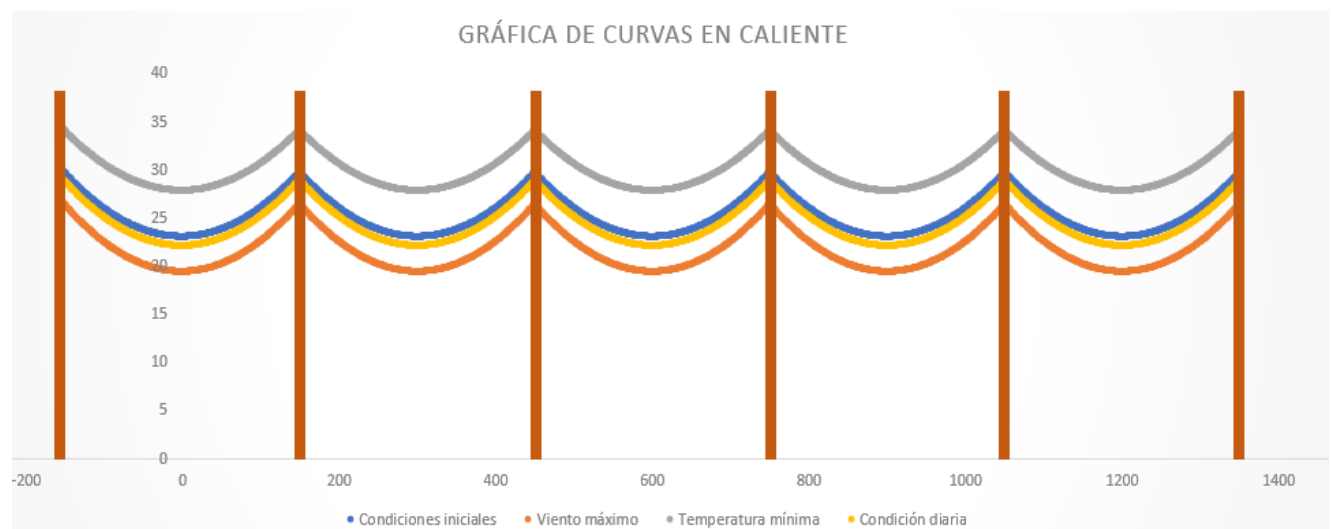
El programa realiza el análisis de cargas para una condición normal a partir de las estructuras requeridas en el diseño, como se ve en la **Ilustración 37**

### Ilustración 37. Cargas de los elementos de la línea

| HIPOTESIS NORMAL      |                   |          |
|-----------------------|-------------------|----------|
| Puntos de carga       | Cargas verticales | Total    |
| P1                    | 0                 | 0        |
| P2                    | 439,0067          | 439,0067 |
| P3                    | 0                 | 0        |
| P4                    | 439,0067          | 439,0067 |
| P5                    | 0                 | 0        |
| P6                    | 439,0067          | 439,0067 |
| Cargas Transversales  |                   |          |
| P1                    | 0                 | 0        |
| P2                    | 100,4863          | 100,4863 |
| P3                    | 0                 | 0        |
| P4                    | 100,4863          | 100,4863 |
| P5                    | 0                 | 0        |
| P6                    | 100,4863          | 100,4863 |
| Cargas Longitudinales |                   |          |
| P1                    | 0                 | 0        |
| P2                    | 0                 | 0        |
| P3                    | 0                 | 0        |
| P4                    | 0                 | 0        |
| P5                    | 0                 | 0        |
| P6                    | 0                 | 0        |

Para lo anterior se realiza una comparación que permite visualizar el perfil de estructuras y catenarias en todas las hipótesis de tiempo en un tramo unitario de línea igual a 1,5 km de longitud, al analizar la longitud de la flecha que se genera en un terreno plano.

### Ilustración 38. Vista de perfil



## **5.5 Conclusiones**

Como demuestra el procedimiento de los cálculos teóricos establecidos para la obtención de los parámetros para el diseño de una línea de transmisión eléctrica se logró diseñar un software que realiza cálculos mecánicos y eléctricos que es posible ejecutar de manera ágil de acuerdo con las necesidades, puesto que estará grabada en una macro en Microsoft Excel permitiendo el acceso a todos los usuarios sin necesidad de una conexión a internet, aplicaciones o programas, agregado a lo anterior, se requieren pocos datos de entrada, así mismo, tiene una base de datos fácilmente actualizable respecto a la información de conductores. El programa no tiene en cuenta aspectos económicos en el diseño de la línea de transmisión.

## 5.6 Glosario

**AWG:** Acrónimo de American Wire Gauge / calibre de alambre estadounidense.

**Algoritmo:** Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.

**ASTM:** Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, desarrolla normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

**Campo eléctrico:** Magnitud escalar definida como el cociente de la fuerza eléctrica entre la carga.

**Carga de rotura:** carga que causa fractura en la línea

**Catenaria:** Es la curva que se forma al suspender un cable de dos puntos o apoyos.

**Confiabilidad:** es la posibilidad de que un equipo, máquina o sistema, realice su función determinada de acuerdo con las condiciones de operación, dentro de un período de tiempo definido.

**CREG:** Comisión de regulación de energía y gas.

**Eficiencia:** Óptima utilización de los recursos disponibles para la obtención de resultados deseados.

**Flecha:** distancia vertical en un vano, entre un conductor y la línea recta cuyos puntos de sujeción se unen a los soportes.

**Flecha inclinada:** distancia en un vano, entre un conductor inclinado por efecto del viento y la línea recta cuyos puntos de sujeción se unen a los soportes.

**Flecha máxima:** distancia vertical máxima, en un vano, entre un conductor y la línea recta cuyos puntos de sujeción se unen a los soportes en condición final a temperatura máxima.

**Hipótesis de carga:** conjunto de condiciones definidas por normas nacionales, reglamentos particulares o por un estudio de datos meteorológicos, que se deben tener en cuenta para calcular cada elemento de una línea

**Impedancia:** Resistencia aparente de un circuito eléctrico al paso de la corriente alterna.

**Lenguaje de programación:** es un lenguaje formal diseñado para realizar procesos que pueden ser llevados a cabo por máquinas como las computadoras

**Línea de transmisión:** Es el sistema de estructuras y dispositivos que se utilizan para transportar o guiar la energía eléctrica desde una fuente de generación a los centros de consumo.

**Longitud del vano:** distancia horizontal entre los puntos de sujeción del conductor sobre dos soportes consecutivos.

**Mitigación:** Conjunto de acciones y medidas, estructurales o no-estructurales, dirigidas a “reducir” las condiciones de vulnerabilidad o la exposición a las amenazas de las comunidades y su infraestructura.

**NTC:** Norma técnica colombiana

**Regulación:** Razón en porcentaje entre la diferencia de magnitudes de la tensión en el receptor en vacío y a plena carga.

**RETIE:** Reglamento técnico de instalaciones eléctricas

**Software:** Es el conjunto de programas de cómputo, procedimientos, reglas, documentación y datos asociados que forman parte de las operaciones de un sistema de computación.

**Temperatura coincidente:** es la temperatura ambiente que se presenta en la condición de viento, se utiliza la temperatura mínima promedio.

**Tensión disruptiva:** indica la fuerza del campo eléctrico para un aislador sujeto a una descarga disruptiva en la forma de un arco eléctrico. La fuerza disruptiva se mide usualmente en kV/mm.

**Vano:** Distancia horizontal entre dos estructuras consecutivas de una línea de transmisión.

## 5.7 Referencias

- Centelsa. (03 de Mayo de 2022). *Productos Centelsa*. Obtenido de Cables de energia y telecomunicaciones: <https://www.centelsa.com/aluminio-desnudo/>
- Checa, L. M. (1988). Alfaomega *Lineas de transporte de energia obtenido de*. [https://www.academia.edu/16362856/Lineas\\_de\\_Transporte\\_de\\_Energia\\_Luis\\_Maria\\_Checa\\_Ed\\_Marcombo](https://www.academia.edu/16362856/Lineas_de_Transporte_de_Energia_Luis_Maria_Checa_Ed_Marcombo)
- Ministerio de Minas y energia . Obtenido de LEY 143 DE 1994. 12 de Julio de 1994 (Colombia): [https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/667537/Ley\\_143\\_1994.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/667537/Ley_143_1994.pdf)
- Empresas de sector electrico, E. E. (1999). *Red de justicia ambiental Colombia*. Obtenido de Guia ambiental para proyectos de transmision de energia electrica.
- EPM, (2019) Guía Técnica, Cálculo mecánico de estructuras y elementos de sujeción de equipos. Obtenido Normas vigentes Electrificadora de santander: [https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Norma\\_Tecnica\\_Vigente/Normas\\_Complementarias\\_Dise%C3%B1o/GM-12%20GUIA%20METODOLOGICA%20CALCULO%20ELECTROMECHANICO%20Y%20ELEMENTOS%20DE%20SUJECION.pdf](https://www.essa.com.co/site/Portals/clientes/Norma_Tecnica_Vigente/Normas_Complementarias_Dise%C3%B1o/GM-12%20GUIA%20METODOLOGICA%20CALCULO%20ELECTROMECHANICO%20Y%20ELEMENTOS%20DE%20SUJECION.pdf)
- Mujal, R. M. (2002). Calculo de lineas y redes electricas. En R. M. Mujal, *Calculo de lineas y redes electricas* (pág. 45). Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL.
- Vela, R. N. (2013). Universidad Veracruzana *Lineas de Transmision*. Mexico: Primera edicion.obtenido de <http://libros.uv.mx/index.php/UV/catalog/download/FC173/124/384-1?inline=1>
- Vázquez, G (2014) Software de la computadora. Tecnología y Educación. Recuperado de <https://memuxcompserv.wixsite.com/tecnologia-educacion/software-de-la-computadora>

T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, C. Stein, *Introduction to Algorithm*. Cambridge: Mit Press, 2009, p. 26. Recuperado de <https://ude.edu.uy/que-son-algoritmos/>

Olarte, L (2018) Lenguaje de programación. Conogasi (Aprender es conocer) Recuperado de <https://conogasi.org/articulos/lenguaje-de-programacion/>