Memoria de cálculos mecánicos de la red subterránea de media tensión

José Alejandro Noy Estrada

Alison Daniela Nuñez Martínez

Director

Rolando Andrés Rincón Saravia, MBA

Magíster en Dirección de Empresas

Codirector

Óscar Arnulfo Quiroga Quiroga, PhD, MSc.

Doctor en Tecnología

Magíster en Informática Industrial y Automática

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2026

Índice

Resumen **7**

Abstract **8**

Introducción **9**

1. Normas y documentos usados **9**

1.1. Criterios técnicos establecidos por ENERCA 10

1.2. Alcance técnico 11

1.3. Punto de conexión y capacidad 12

1.4. Topología y rutas 13

1.5. Protecciones y conectores asociados a la topología 14

1.6. Cable empleado en el desarrollo ruta por ruta 15

2. Metodología general de cálculo **15**

2.1. Secuencia de trabajo 15

2.2. Ocupación del ducto 16

2.3. Distribución de conductores en ducto 16

2.4. Factores de corrección por peso 17

2.5. Peso lineal de los tres cables 17

2.6. Tensión máxima permisible de halado 18

2.7. Tensión en tramo recto y longitud mecánica 19

2.8. Determinación de los ángulos reales del trazado 19

2.9. Tensión a la salida de una curva 20

2.10. Presión lateral 20

2.11. Radio mínimo de curvatura 21

2.12. Secciones de tiro y clasificación de cámaras 21

2.13. Longitud de cable, ductos y empalmes 22

2.14. Matriz de trazabilidad de ecuaciones 24

3. Ruta T01: Punto de conexión - Punto Y **25**

3.1. Datos tomados para la ruta 25

3.2. Desarrollo mecánico y de instalación 26

3.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso 26

3.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro 26

3.2.3. Número de secciones y cámaras interiores 27

3.2.4. Tensión de halado y presión lateral 27

3.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación 28

3.3. Resumen final de la ruta 28

4. Ruta T02: Punto Y - Orión **29**

4.1. Datos tomados para la ruta 30

4.2. Desarrollo mecánico y de instalación 30

4.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso 30

4.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro 31

4.2.3. Número de secciones y cámaras interiores 31

4.2.4. Tensión de halado y presión lateral 31

4.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación 32

4.3. Resumen final de la ruta 33

5. Ruta T03: Orión - La Ponderosa **34**

5.1. Datos tomados para la ruta 34

5.2. Desarrollo mecánico y de instalación 35

5.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso 35

5.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro 35

5.2.3. Número de secciones y cámaras interiores 36

5.2.4. Tensión de halado y presión lateral 36

5.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación 37

5.3. Resumen final de la ruta 37

6. Ruta T04: La Ponderosa - El Zafiro **38**

6.1. Datos tomados para la ruta 39

6.2. Desarrollo mecánico y de instalación 39
6.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso 39
6.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro 40
6.2.3. Número de secciones y cámaras interiores 40
6.2.4. Tensión de halado y presión lateral 40
6.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación 41
6.3. Resumen final de la ruta 42

7. Ruta T05: Punto Y - El Oasis 43
7.1. Datos tomados para la ruta 43
7.2. Desarrollo mecánico y de instalación 44
7.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso 44
7.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro 44
7.2.3. Número de secciones y cámaras interiores 45
7.2.4. Tensión de halado y presión lateral 45
7.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación 46
7.3. Resumen final de la ruta 46

8. Ruta T06: El Oasis - Antares 47
8.1. Datos tomados para la ruta 48
8.2. Desarrollo mecánico y de instalación 48
8.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso 48
8.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro 49
8.2.3. Número de secciones y cámaras interiores 49
8.2.4. Tensión de halado y presión lateral 49
8.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación 50
8.3. Resumen final de la ruta 51

9. Registro de ángulos del trazado 52

10. Resumen general de las seis rutas 56

11. Criterios finales del diseño 57

12.Conclusiones **59**

Referencias bibliográficas **60**

Índice de cuadros

1. Normas y documentos aplicados en la memoria de cálculos mecánicos 9
2. Información general del proyecto 12
3. Rutas y longitudes empleadas en el cálculo mecánico 13
4. Propiedades mecánicas y eléctricas del cable de cobre 2 AWG seleccionado 15
5. Clasificación final de cámaras interiores por ruta 22
6. Ecuaciones mecánicas utilizadas 24
7. Datos de entrada mecánicos de la ruta T01 25
8. Resumen de resultados mecánicos de la ruta T01 28
9. Datos de entrada mecánicos de la ruta T02 30
10. Resumen de resultados mecánicos de la ruta T02 33
11. Datos de entrada mecánicos de la ruta T03 34
12. Resumen de resultados mecánicos de la ruta T03 37
13. Datos de entrada mecánicos de la ruta T04 39
14. Resumen de resultados mecánicos de la ruta T04 42
15. Datos de entrada mecánicos de la ruta T05 43
16. Resumen de resultados mecánicos de la ruta T05 46
17. Datos de entrada mecánicos de la ruta T06 48
18. Resumen de resultados mecánicos de la ruta T06 51
19. Vértices y ángulos reales de las seis rutas 52
20. Resultados mecánicos y clasificación final de cámaras por ruta 56
21. Resultados generales del cálculo mecánico 56

Resumen

Título: Memoria de cálculos mecánicos de la red subterránea de media tensión.

Autores: José Alejandro Noy Estrada y Alison Daniela Núñez Martínez.

Palabras clave: red subterránea, media tensión, ductos, halado de cables, cámaras, ángulos de trazado, transiciones.

Descripción: Este trabajo presenta el desarrollo de los cálculos mecánicos y constructivos de la red subterránea de media tensión proyectada para la vereda Matanegra. El análisis parte de la geometría definida para las rutas y de las características de los conductores y ductos seleccionados. A partir de estas condiciones, se verifican los principales criterios mecánicos asociados al tendido de los conductores, como la ocupación de la canalización, la tensión de halado, la presión lateral, el radio mínimo de curvatura y la definición de las secciones de tiro.

La distribución de las cámaras se establece teniendo en cuenta la geometría real de las rutas, los cambios de dirección y los puntos singulares requeridos por la configuración de la red. De igual manera, se consideran los empalmes de media tensión dentro de las cámaras previstas, evitando generar elementos adicionales cuando las condiciones del diseño permiten integrarlos en estas. Finalmente, los resultados obtenidos permiten comprobar que las rutas propuestas cumplen con los criterios mecánicos establecidos y que la configuración planteada es técnicamente adecuada para el desarrollo de la red subterránea de media tensión.

Abstract

Title: Report on Mechanical Calculations for the Underground Medium-Voltage Network.

Authors: José Alejandro Noy Estrada and Alison Daniela Núñez Martínez.

Keywords: underground network, medium voltage, conduits, cable pulling, manholes, alignment angles, transitions. .

Description: This paper presents the mechanical and structural calculations for the medium-voltage underground network planned for the village of Matanegra. The analysis is based on the defined geometry of the routes and the characteristics of the selected conductors and conduits. Based on these conditions, the main mechanical criteria associated with conductor installation are verified, such as conduit occupancy, pulling tension, lateral pressure, minimum bend radius, and the definition of pulling sections.

The distribution of the chambers is established by taking into account the actual geometry of the routes, changes in direction, and the singular points required by the network configuration. Similarly, medium-voltage joints within the planned chambers are considered, avoiding the creation of additional elements when design conditions allow them to be integrated into these chambers. Finally, the results obtained confirm that the proposed routes comply with the established mechanical criteria and that the proposed configuration is technically suitable for the development of the underground medium-voltage network.

Introducción

El diseño mecánico de la red subterránea de media tensión busca comprobar que los conductores y el sistema de canalización cumplan con las condiciones necesarias para su tendido, sin superar los límites mecánicos establecidos para los cables. Para esto, se analizan aspectos como la ocupación de los ductos, la tensión de halado, la presión lateral en las curvas, el radio mínimo de curvatura y la longitud de las secciones de tiro.

El trazado de la red se plantea siguiendo, en lo posible, el recorrido de la vía de acceso, con el fin de facilitar las condiciones de construcción, operación y mantenimiento. Además, debido a las características del terreno y a la condición de sabana inundable de la zona, se tienen en cuenta las condiciones de pendiente y drenaje asociadas a las canalizaciones y cámaras.

La geometría de las rutas se define a partir del trazado realizado en Google Earth, donde se identifican los cambios de dirección presentes en cada recorrido. Los ángulos obtenidos se consideran para la ubicación de las cámaras y para las verificaciones mecánicas asociadas al halado de los conductores [11, 10].

1. Normas y documentos usados

Cuadro 1
Normas y documentos aplicados en la memoria de cálculos mecánicos

Entidad	**Documento o numeral**	**Aplicación en el cálculo**
Ministerio de Minas y Energía	RETIE vigente, Resolución 40284 del 23 de junio de 2026, Libro 3	Requisitos de seguridad y condiciones aplicables a instalaciones y redes subterráneas [1].
ICONTEC	NTC 2050, artículo 300.34, Tabla 300.50 y capítulo 9, Tabla 1	Radio de curvatura, profundidad y ocupación de canalizaciones [2].

Entidad	Documento o numeral	Aplicación en el cálculo
ENERCA	NR-MMD-PEG-01, versión 01, numeral 1.7.2 y Tablas 3, 7, 9, 11, 12 y 13	Ductos PVC DB de 6 in, pendiente, cámaras, drenaje, profundidades, calibre mínimo, ampacidad, regulación de tensión y pérdidas [3].
ESSA	NTR-02, numerales 11.2 a 11.6	Relación de atoramiento, factores de peso, tensión de halado, presión lateral y radio mínimo [4].
EPM	RS1-021, canalización de redes de energía	Referencia complementaria para bancos de ductos, rellenos y pruebas de canalización [5].
Nexans/Centelsa	Cable Media Tensión Cobre 90 °C XLPE 15 kV, 100 %; referencia 201726	Sección, diámetro, masa, ampacidad, tensión máxima de halado y radio mínimo del cable de cobre 2 AWG [6].
IEEE	IEEE 386-2025	Requisitos de sistemas de conectores separables loadbreak y deadbreak para clases de 15 kV a 35 kV [7].
Eaton	K-Limiter High Ampere Companion II / Overhead Line Installation and Protective Equipment	Datos del fusible limitador de respaldo K-Limiter 65K y tabla de coordinación con enlaces ANSI tipo K [8].

1.1. Criterios técnicos establecidos por ENERCA

Para la red subterránea de media tensión de 13,2 kV se aplican los criterios del numeral 1.7.2 y de las tablas técnicas suministradas por ENERCA [3]:

1. El calibre mínimo permitido para redes subterráneas de uso general a 13,2 kV es 2 AWG, en cobre o aluminio. El proyecto mantiene el conductor de cobre 2 AWG, XLPE, clase 15 kV.

2. En espacio público, la canalización de media tensión se proyecta en ducto nominal de 6 in, con

un circuito trifásico por ducto.

3. Solamente se admiten ductos de uso eléctrico tipo PVC DB.

4. Los ductos deben instalarse con pendiente mínima de 0,1 % hacia las cámaras de inspección. El proyecto define una pendiente de 3 %, superior al mínimo exigido.

5. En tramos rectos, las cámaras de inspección o de paso deben disponerse a distancias no mayores de 80 m, salvo una condición técnica debidamente sustentada.

6. Las transiciones entre tipos de cables, las conexiones a cargas y las derivaciones deben realizarse en cámaras o cajas de inspección con las condiciones de protección aplicables. El mismo criterio se aplica cuando la canalización cruza otros servicios o estructuras subterráneas.

7. Las cámaras o cajas de inspección deben disponer de drenaje para evitar acumulaciones de agua que puedan generar riesgo eléctrico.

8. Para circuitos mayores de 1 kV y hasta 22 kV instalados en tubo PVC o HDPE, la Tabla 3 establece una cubierta mínima general de 450 mm. En áreas sometidas a tráfico vehicular, la cubierta mínima es 600 mm.

Criterios eléctricos complementarios. La Tabla 9 asigna al conductor de cobre 2 AWG una capacidad de corriente de 155 A a 90 °C. Para redes de 13,2 kV, la Tabla 12 fija una regulación máxima permisible de 3 %, y la Tabla 13 establece pérdidas máximas de potencia activa de 2,5 % y pérdidas de energía activa de 1,5 %. La Tabla 11 fija los límites de distorsión armónica de corriente en función de la relación I_{sc}/I_L; esta verificación requiere el estudio de cortocircuito y se mantiene fuera del alcance mecánico de la presente memoria [3].

Cruces de vías vehiculares. En los sectores con tráfico vehicular se emplea como mínimo una cubierta de 0,60 m, junto con las medidas de protección mecánica, compactación y estabilidad de rellenos definidas en los detalles constructivos del proyecto [3, 1, 2].

1.2. Alcance técnico

La presente memoria desarrolla la verificación mecánica del tendido de la red subterránea de media tensión proyectada para la vereda Matanegra. El análisis mantiene tres cables monopolares de

cobre calibre 2 AWG, con aislamiento XLPE, clase 15 kV y nivel de aislamiento del 100 %, conforme a la selección definida para el proyecto. Cada circuito trifásico se instala en ducto eléctrico PVC DB nominal de 6 in, de acuerdo con el numeral 1.7.2 de ENERCA [3]. Las dimensiones y características mecánicas del cable de potencia se toman de la ficha técnica Nexans/Centelsa referencia 201726 [6].

El cálculo comprende ocupación del ducto, relación de atoramiento, factores de corrección por peso, peso lineal, tensión de halado, longitud de las secciones de tiro, ángulos reales del trazado, presión lateral, radio mínimo de curvatura, distribución de cámaras, ductos, conductores y empalmes. Los 178 vértices obtenidos del trazado en Google Earth se mantienen como puntos de cambio de dirección para delimitar las secciones de halado. Adicionalmente, se incorporan cámaras de paso cuando son necesarias para que ningún tramo recto supere 80 m [11, 10].

Los cálculos de cortocircuito, coordinación de protecciones, SPT y bonding corresponden a estudios independientes. En particular, la ocupación mecánica desarrollada en esta memoria se calcula para la terna de conductores de potencia definida en el libro de cálculo actualizado.

1.3. Punto de conexión y capacidad

Cuadro 2
Información general del proyecto

Dato	Valor	Unidad
Circuito de conexión	21582	–
Tensión nominal de la red	13,2	kV
Carga instalada	75	kVA
Capacidad máxima disponible	157,755	kW
Número de rutas subterráneas	6	und
Longitud georreferenciada total	14.637,947	m
Número de cables monopolares de potencia por circuito	3	und
Tipo de ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Número de ductos considerados en cantidades	2	und
Separación máxima entre cámaras en tramos rectos	80	m
Pendiente de diseño entre cámaras	3,0	%
Pendiente mínima ENERCA	0,1	%
Cubierta mínima general en PVC/HDPE	0,45	m
Cubierta mínima en áreas con tráfico vehicular	0,60	m

Fuente: libro de cálculo consolidado del proyecto [10] y ENERCA NR-MMD-PEG-01 versión 01 [3].

Como comprobación eléctrica complementaria, la corriente analítica máxima de diseño es 3,772 A, la mayor corriente de fase del flujo de carga es 8,219 A, la ampacidad corregida del conductor es 143,502 A y la caída máxima acumulada es 0,171 %, inferior al límite ENERCA de 3 % [10, 3]. Las pérdidas resistivas totales calculadas son 0,367 kW; el libro de cálculo verifica las pérdidas de potencia frente al límite de 2,5 %. El límite de energía de 1,5 % requiere un perfil o balance energético y no se obtiene de un único flujo de carga.

1.4. Topología y rutas

Cuadro 3
Rutas y longitudes empleadas en el cálculo mecánico

ID	Ruta	Tramo padre	Longitud [m]
T01	Punto de conexión - Punto Y	–	2.086,091
T02	Punto Y - Orión	T01	2.436,876
T03	Orión - La Ponderosa	T02	2.792,051
T04	La Ponderosa - El Zafiro	T03	1.396,510
T05	Punto Y - El Oasis	T01	1.248,674
T06	El Oasis - Antares	T05	4.677,746

Fuente: rutas georreferenciadas y libro de cálculo del proyecto [11, 10].

La secuencia funcional de la red es:

1. Red aérea existente → punto de conexión → transición aéreo-subterránea → T01 → Punto Y.
2. Punto Y permanece completamente subterráneo y constituye el nodo de derivación hacia T02 y T05. En CAM-Y se dispone un barraje de 200 A con nueve conectores separables tipo codo *loadbreak*, correspondientes a tres circuitos trifásicos, bajo IEEE 386-2025 [7, 10].
3. En el ramal oriental: T02 termina en el nodo Orión, T03 en La Ponderosa y T04 en El Zafiro. En Orión y La Ponderosa existe continuidad hacia la siguiente ruta mediante una nueva transición aéreo-subterránea.
4. En el ramal sur: T05 termina en El Oasis y T06 en Antares. En El Oasis existe continuidad hacia T06 mediante una nueva transición aéreo-subterránea.
5. Las rutas que llegan a las fincas terminan físicamente en el poste de transformación correspondiente. Cuando existe continuidad hacia una ruta siguiente, esta se realiza desde el mismo

nodo de media tensión mediante una nueva transición aéreo-subterránea, de acuerdo con la secuencia definida en el libro de cálculo [10].

Se contabilizan cuatro operaciones aéreo-subterráneas y cinco subterráneo-aéreas, para un total de nueve operaciones de transición. Los cinco transformadores de 15 kV A se ubican en Orión, La Ponderosa, El Zafiro, El Oasis y Antares [10].

1.5. Protecciones y conectores asociados a la topología

Las salidas T02 y T05 se protegen con un fusible limitador de corriente de respaldo K-Limiter 65K, en conjunto trifásico. La coordinación se establece con los enlaces ANSI tipo K de 1 A utilizados en la protección primaria de los transformadores: Eaton publica que un K-Limiter 65K coordina con enlaces ANSI tipo K hasta 65 A [8]. El K-Limiter es una protección de respaldo y se aplica en serie con una protección de expulsión o enlace débil; su tensión nominal debe seleccionarse con la tabla de aplicación del fabricante según la configuración y puesta a tierra reales del sistema de 13,2 kV [8].

Para el K-Limiter 65K, el fabricante publica corriente continua máxima de 100 A, capacidad de interrupción de 50 kA y energía máxima pasante de 240 000 A^2s. Estas magnitudes son compatibles con las corrientes de carga del proyecto [8, 10].

Cada transformador de 15 kV A dispone de protección primaria mediante portafusible tipo cañuela y enlace tipo K, además de tres DPS de 12 kV, 10 kA, instalados aguas abajo de la protección de sobrecorriente y próximos a los bujes de media tensión, conforme al criterio ENERCA [3].

1.6. Cable empleado en el desarrollo ruta por ruta

Cuadro 4
Propiedades mecánicas y eléctricas del cable de cobre 2 AWG seleccionado

Propiedad	Valor	Unidad
Material	Cobre suave, cableado compacto clase B	–
Calibre	2 AWG	–
Sección nominal	33,6	mm^2
Número de hilos	7	und
Aislamiento	XLPE, cable monopolar apantallado, 100 %	–
Clase de tensión	15	kV
Diámetro del conductor	6,81	mm
Diámetro exterior nominal	21,58	mm
Masa aproximada	700	kg/km
Tensión máxima de halado por conductor	203,943	kgf
Tensión máxima equivalente por conductor	2,000	kN
Radio mínimo de cálculo	258,96	mm
Ampacidad base a 90 °C	155	A
Longitud de carrete de diseño	500	m

Fuente: Nexans/Centelsa referencia 201726 para propiedades del cable [6]; ENERCA Tabla 9 para la capacidad de corriente de cobre 2 AWG a 90° C [3]; longitud de carrete definida en el libro de cálculo [10].

El conductor de cobre 2 AWG se mantiene sin modificación. Además, coincide con el calibre mínimo establecido por ENERCA para redes subterráneas de uso general a 13,2 kV, según la Tabla 7 [3].

2. Metodología general de cálculo

2.1. Secuencia de trabajo

La metodología mecánica se aplica en el siguiente orden:

1. Identificar la longitud, los vértices y la geometría de cada ruta desde los archivos KMZ.
2. Mantener el cable de cobre 2 AWG y definir el ducto PVC DB nominal de 6 in.
3. Verificar la ocupación del ducto y la relación de atoramiento.

4. Calcular los factores de corrección por peso y el peso lineal del conjunto.
5. Determinar la tensión máxima permisible de halado y la longitud mecánica posible.
6. Identificar cada vértice real, su abscisa y su ángulo de cambio de dirección.
7. Mantener los vértices como puntos de cámara para el criterio de halado y agregar cámaras de paso solamente donde se requieran para que la separación en tramos rectos no supere 80 m.
8. Verificar tensión de halado, presión lateral y radio mínimo de curvatura.
9. Cuantificar cable, ductos, cámaras y empalmes por ruta.

2.2. Ocupación del ducto

La ocupación geométrica del ducto para la terna de potencia se calcula con:

$$F_{\text{llenado}} = n_f \left(\frac{d}{D} \right)^2 100. \tag{1}$$

Fuente de la ecuación: relación geométrica entre áreas circulares; límite de ocupación tomado de NTC 2050, capítulo 9, Tabla 1 [2]; diámetro exterior del cable tomado de Nexans/Centelsa [6].

Donde: $n_f = 3$, $d = 21{,}58\,\text{mm}$ y el ducto nominal de 6 in se representa en el cálculo con $D = 152{,}4\,\text{mm}$.

$$F_{\text{llenado}} = 3 \left(\frac{21{,}58}{152{,}4} \right)^2 100 = 6{,}015\,\%.$$

Resultado. La ocupación de la terna de potencia es 6,015 %, inferior al límite de 40 %.

2.3. Distribución de conductores en ducto

La relación de atoramiento se determina mediante:

$$J = \frac{D}{d}. \tag{2}$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02, numeral 11.2 [4].

$$J = \frac{152.4}{21.58} = 7{,}062095.$$

Resultado. Se obtiene $J = 7{,}062095$ para la terna de potencia.

2.4. Factores de corrección por peso

Para disposición triangular:

$$\omega_{3a} = 1 + \frac{4}{3}\left(\frac{d}{D-d}\right)^2. \tag{3}$$

Para disposición en cuna o V:

$$\omega_{3t} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{D-d}\right)^2}}. \tag{4}$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02, numeral 11.5 [4].

$$\omega_{3a} = 1{,}036282, \qquad \omega_{3t} = 1{,}013890.$$

Para el cálculo se define:

$$\omega = \max(\omega_{3a}, \omega_{3t}). \tag{5}$$

$$\omega = 1{,}036282.$$

Resultado. El factor de peso utilizado es $\omega = 1{,}036282$.

2.5. Peso lineal de los tres cables

La masa del fabricante es 700 kg/km por cable [6]. La conversión por conductor es:

$$m_c' = \frac{m_c}{1000}. \tag{6}$$

$$m_c' = \frac{700}{1000} = 0{,}700\,\text{kg/m}.$$

Para tres conductores:

$$m' = n_c m'_c. \tag{7}$$

$$m' = 3(0.700) = 2{,}100\,\mathrm{kg/m}.$$

El peso lineal en SI es:

$$w = m' g_0. \tag{8}$$

$$w = (2.100)(9.80665) = 20{,}594\,\mathrm{N/m}.$$

Para expresarlo en kgf/m:

$$W = \frac{w}{9.80665}. \tag{9}$$

$$W = 2{,}100\,\mathrm{kgf/m}.$$

Resultado. El peso lineal usado en las ecuaciones de halado es $W = 2{,}100\,\mathrm{kgf/m}$.

2.6. Tensión máxima permisible de halado

La formulación de la NTR-02 se expresa como:

$$T_{\mathrm{máx,NTR}} = T_m n_c A. \tag{10}$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02, numeral 11.3 [4]; capacidad mecánica del conductor tomada de Nexans/Centelsa [6].

$$T_{\mathrm{máx,NTR}} = 6{,}06974(3)(33{,}6) = 611{,}830\,\mathrm{kgf}.$$

El límite conjunto indicado por el fabricante es:

$$T_{\mathrm{máx,fab}} = n_c T_{\mathrm{máx},c}. \tag{11}$$

$$T_{\mathrm{máx,fab}} = 3(2{,}000\,\mathrm{kN}) = 611{,}830\,\mathrm{kgf}.$$

La tensión máxima de cálculo es:

$$T_{\text{máx}} = \text{mín}(T_{\text{máx,NTR}}, T_{\text{máx,fab}}). \tag{12}$$

Resultado. Para la terna se utiliza $T_{\text{máx}} = 611{,}830\,\text{kgf}$.

2.7. Tensión en tramo recto y longitud mecánica

La tensión al final de un tramo recto se calcula mediante:

$$T_{\text{recta}} = \omega f L W. \tag{13}$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02, numeral 11.3 [4].

La longitud mecánica máxima se obtiene con:

$$L_{\text{máx,mec}} = \frac{T_{\text{máx}}}{\omega f W}. \tag{14}$$

$$L_{\text{máx,mec}} = \frac{611{,}830}{1{,}036282(0{,}516)(2{,}100)} = 544{,}858\,\text{m}.$$

Para cada ruta, la longitud de verificación es:

$$L_{\text{tiro},i} = \text{mín}(L_{\text{máx,mec}}, L_{\text{cam,max},i}, L_{\text{carrete}}). \tag{15}$$

Fuente de la ecuación: criterio del proyecto que integra capacidad mecánica, separación real entre cámaras conforme a ENERCA 1.7.2(e) [3] y longitud de carrete de $500\,\text{m}$ *[10].*

2.8. Determinación de los ángulos reales del trazado

Para cada vértice se obtienen el azimut de entrada $\alpha_{\text{ent},j}$ y el azimut de salida $\alpha_{\text{sal},j}$. La deflexión se normaliza al intervalo $(-180^\circ, 180^\circ]$:

$$\Delta\alpha_j = \text{mod}(\alpha_{\text{sal},j} - \alpha_{\text{ent},j} + 180^\circ, 360^\circ) - 180^\circ, \qquad \theta_j = |\Delta\alpha_j|. \tag{16}$$

Fuente de la ecuación: procesamiento geométrico de los vértices del trazado KMZ y tratamiento geodésico WGS84 [9, 11].

Resultado. Se obtienen 178 vértices con ángulo calculable: 41 en T01, 19 en T02, 50 en T03, 25 en T04, 10 en T05 y 33 en T06. El mayor ángulo de la red es 83,269°, localizado en T03.

2.9. Tensión a la salida de una curva

La relación de Euler–Eytelwein se utiliza para el incremento de tensión en una curva:

$$T_{\mathrm{sal},j} = T_{\mathrm{ent},j} e^{f\theta_j}. \tag{17}$$

Fuente de la ecuación: relación de Euler–Eytelwein [12, 13].

La utilización de halado se expresa como:

$$U_T = \frac{T_{\mathrm{sal}}}{T_{\mathrm{máx}}} 100. \tag{18}$$

2.10. Presión lateral

Para disposición triangular:

$$P_{L,a} = \frac{(3\omega_{3a} - 2) T_{\mathrm{sal}}}{3R}. \tag{19}$$

Para disposición en cuna/V:

$$P_{L,t} = \frac{\omega_{3t} T_{\mathrm{sal}}}{2R}. \tag{20}$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02, numeral 11.5 [4].

La presión de diseño es:

$$P_{L,\mathrm{diseño}} = \max(P_{L,a}, P_{L,t}). \tag{21}$$

Resultado. La mayor presión lateral de las seis rutas es 94,584 kgf/m, inferior al límite de referencia de 745 kgf/m.

2.11. Radio mínimo de curvatura

Para el cable apantallado:

$$R_{\text{mín}} = 12d. \tag{22}$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02, numeral 11.6, con remisión a NTC 2050, artículo 300.34 [4, 2].

$$R_{\text{mín}} = 12(0{,}02158) = 0{,}25896\,\text{m}.$$

Resultado. El radio instalado de diseño de 1 m supera el radio mínimo de 0,25896 m.

2.12. Secciones de tiro y clasificación de cámaras

ENERCA establece que las cámaras de inspección o paso en tramos rectos deben ubicarse a distancias no mayores de 80 m [3]. El proyecto mantiene además los 178 vértices reales como puntos de cámara para delimitar las secciones de tiro. Para cada intervalo entre puntos obligatorios consecutivos:

$$N_{\text{paso},i,j} = \text{máx}\left[0, \left\lceil \frac{\Delta s_{i,j}}{L_{\text{cam}}} \right\rceil - 1\right]. \tag{23}$$

Fuente de la ecuación: modelo de distribución aplicado a $L_{\text{cam}} = 80\,\text{m}$, conforme a ENERCA 1.7.2(e) [3].

Las cámaras interiores de una ruta son:

$$N_{\text{cam,int},i} = N_{\text{dir},i} + \sum_{j} N_{\text{paso},i,j}. \tag{24}$$

Las secciones de tiro son:

$$N_{\text{sec},i} = N_{\text{cam,int},i} + 1. \tag{25}$$

Para toda la red:

$$N_{\text{cam,total}} = N_{\text{nodo}} + N_{\text{dir,total}} + N_{\text{paso,total}}. \tag{26}$$

$$N_{\text{cam,total}} = 7 + 178 + 84 = 269.$$

Los 27 empalmes trifásicos se alojan en cámaras de la distribución ya contabilizada; por ello, no se suman nuevamente al total físico.

Cuadro 5
Clasificación final de cámaras interiores por ruta

Ruta	Cambio dir.	Paso adic.	Interiores	Empalmes	Sep. máx. [m]
T01	41	3	44	4	78,095
T02	19	22	41	5	79,861
T03	50	9	59	5	78,492
T04	25	2	27	2	75,517
T05	10	10	20	2	78,641
T06	33	38	71	9	79,518
Total	**178**	**84**	**262**	**27**	–

Fuente: libro consolidado de cámaras y ángulos del proyecto [10, 11].

Resultado. La red contiene 269 cámaras físicas: 7 nodos y 262 cámaras interiores. La máxima separación real es 79,861 m, inferior a 80 m.

2.13. Longitud de cable, ductos y empalmes

La longitud de cable monopolar por ruta es:

$$L_{\text{cable},i} = L_i n_f F_{\text{cable}}. \tag{27}$$

Fuente de la ecuación: modelo de cantidades del proyecto; $n_f = 3$ y $F_{\text{cable}} = 1.03$.

La longitud total de ductos por ruta es:

$$L_{\text{ducto},i} = L_i n_d F_{\text{ducto}}. \tag{28}$$

Fuente de la ecuación: modelo de cantidades del proyecto; $n_d = 2$, un ducto ocupado y uno de reserva, y $F_{\text{ducto}} = 1.02$ [10].

El número de puntos de empalme se calcula mediante:

$$N_{\text{emp},i} = \max\left(0, \left\lceil \frac{L_i F_{\text{cable}}}{L_{\text{carrete}}} \right\rceil - 1\right). \tag{29}$$

Fuente de la ecuación: modelo de cuantificación del proyecto; $L_{\text{carrete}} = 500\,\text{m}$ [10].

$$L_{\text{cable,total}} = 45{,}231\,\text{km}, \qquad L_{\text{ducto,total}} = 29{,}861\,\text{km}, \qquad N_{\text{emp,total}} = 27\ \text{und}.$$

Resultado. Las cantidades corresponden al modelo de instalación y se coordinan con el suministro de carretes y los planos civiles.

2.14. Matriz de trazabilidad de ecuaciones

Cuadro 6
Ecuaciones mecánicas utilizadas

Ec.	Cálculo	Fuente	Observación
1	Ocupación del ducto	Geometría; NTC 2050; Nexans	Terna MT en ducto PVC DB 6 in.
2	Relación de atoramiento	ESSA NTR-02, 11.2	Parámetro geométrico.
3, 4	Factores de peso	ESSA NTR-02, 11.5	Triangular y cuna/V.
5	Factor de cálculo	Comparación de factores	Se utiliza el mayor.
6–9	Masa y peso lineal	Nexans/Centelsa y conversión de unidades	Entrada de halado.
10–12	Tensión máxima	ESSA NTR-02 + Nexans/Centelsa	Cobre 2 AWG.
13, 14	Tensión recta y longitud mecánica	ESSA NTR-02	Capacidad mecánica.
15	Longitud de tiro	ENERCA 1.7.2(e) + proyecto	Usa separación real por ruta.
16	Ángulo de cambio de dirección	Geometría KMZ / Karney	178 vértices reales.
17, 18	Tensión en curva y utilización	Euler–Eytelwein	Usa ángulo real.
19–21	Presión lateral	ESSA NTR-02, 11.5	Dos configuraciones.
22	Radio mínimo	ESSA NTR-02 11.6; NTC 2050 300.34	Doce diámetros.
23–25	Distribución de cámaras	ENERCA 1.7.2(e) + KMZ	Cambios reales + paso.
26	Cámaras físicas	Consolidación del proyecto	$7 + 178 + 84 = 269$.
27, 28	Longitudes	Modelo de cantidades	Reservas 3 % y 2 %.

Ec.	Cálculo	Fuente	Observación
29	Empalmes	Modelo y carrete de diseño	27 ubicaciones.

3. Ruta T01: Punto de conexión - Punto Y

La ruta T01 tiene una longitud georreferenciada de 2.086,091 m. Para esta ruta se utilizan las propiedades generales del cable de cobre 2 AWG, el ducto PVC DB nominal de 6 in, el coeficiente de fricción y el radio instalado de diseño definidos en la metodología. La geometría proviene del archivo KMZ y los resultados se coordinan con el libro consolidado de cálculo [10, 11].

3.1. Datos tomados para la ruta

Cuadro 7
Datos de entrada mecánicos de la ruta T01

Dato	Valor	Unidad
Longitud de ruta	2.086,091	m
Conductor	Cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, 15 kV, 100 %	
Diámetro exterior del cable	21,58	mm
Masa lineal por cable	700	kg/km
Ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Diámetro usado en la verificación geométrica	152,4	mm
Número de cables de potencia en el ducto	3	und
Coeficiente de fricción	0,516	p.u.
Cámaras por cambio de dirección	41	und
Cámaras de paso adicionales	3	und
Máxima separación real entre cámaras	78,095	m
Ángulo máximo real de la ruta	19,381	grados
Radio instalado de diseño	1,000	m

Fuente: libro de cálculo consolidado [10] y geometría KMZ del proyecto [11].

3.2. Desarrollo mecánico y de instalación

3.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso

$$
\begin{aligned}
F_{\text{llenado}} &= 3\left(\frac{21{,}58}{152{,}4}\right)^2 100 = 6{,}015\,\%,\\
J &= \frac{152.4}{21{,}58} = 7{,}062095,\\
\omega_{3a} &= 1{,}036282,\\
\omega_{3t} &= 1{,}013890,\\
\omega &= 1{,}036282.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: aplicación de las ecuaciones generales; ocupación según NTC 2050 y relaciones mecánicas de ESSA NTR-02 [2, 4].

Resultado. La ocupación de la terna de potencia es 6,015 %, inferior al límite de 40 %.

3.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro

$$
\begin{aligned}
T_{\text{máx,NTR}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx,fab}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
L_{\text{máx,mec}} &= 544{,}858\,\text{m},\\
L_{\text{tiro},T01} &= \text{mín}(544{,}858, 78{,}095, 500) = 78{,}095\,\text{m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02 [4]; datos mecánicos de Nexans/Centelsa [6]; separación real conforme a la distribución final de cámaras [10].

Resultado. La sección más exigente de la ruta es 78,095 m, inferior a 80 m y muy inferior a la longitud mecánica posible de 544,858 m.

3.2.3. Número de secciones y cámaras interiores

$$N_{\mathrm{cam,int},T01} = N_{\mathrm{dir},T01} + N_{\mathrm{paso},T01} = 41 + 3 = 44,$$
$$N_{\mathrm{sec},T01} = N_{\mathrm{cam,int},T01} + 1 = 45.$$

Fuente de la ecuación: Ecuaciones (23)–(25)*; ENERCA NR-MMD-PEG-01 versión 01, numeral 1.7.2(e) [3].*

Resultado. La ruta contiene 41 cámaras por cambio de dirección y 3 cámaras de paso adicionales, para 44 cámaras interiores y 45 secciones de tiro. Los 4 empalmes trifásicos se alojan en cámaras ya contabilizadas.

3.2.4. Tensión de halado y presión lateral

Para la envolvente de verificación se emplean la máxima separación real y el ángulo máximo real de la ruta. Esta combinación evalúa simultáneamente las dos condiciones más exigentes registradas para la ruta.

$$T_{\mathrm{recta},T01} = 1{,}036282(0{,}516)(78{,}095)(2{,}100) = 87{,}694\,\mathrm{kgf},$$
$$T_{\mathrm{sal},T01} = 87{,}694 e^{0{,}516\,\mathrm{rad}(19{,}381^\circ)} = 104{,}418\,\mathrm{kgf},$$
$$U_{T,T01} = \frac{104{,}418}{611{,}830}100 = 17{,}066\,\%,$$
$$P_{L,a,T01} = 38{,}594\,\mathrm{kgf/m},$$
$$P_{L,t,T01} = 52{,}934\,\mathrm{kgf/m},$$
$$P_{L,\mathrm{diseño},T01} = 52{,}934\,\mathrm{kgf/m}.$$

Fuente de la ecuación: tensión recta y presión lateral: ESSA NTR-02 [4]; incremento en curva: Euler–Eytelwein [12, 13]; ángulo real: geometría KMZ [11].

Resultado. La utilización de halado es 17,066 % y la presión lateral de diseño es 52,934 kgf/m; ambos resultados están por debajo de sus límites de verificación.

3.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación

$$R_{\text{mín}} = 12(0{,}02158) = 0{,}25896\,\text{m} < R_{\text{inst}} = 1\,\text{m},$$
$$L_{\text{cable},T01} = 2.086{,}091(3)(1{,}03) = 6.446{,}020\,\text{m},$$
$$L_{\text{ducto},T01} = 2.086{,}091(2)(1{,}02) = 4.255{,}625\,\text{m},$$
$$N_{\text{emp},T01} = 4.$$

Fuente de la ecuación: radio mínimo: ESSA NTR-02 y NTC 2050 artículo 300.34 [4, 2]; cantidades y plan de carretes: modelo del proyecto [10].

Resultado. El radio instalado de 1 m supera el mínimo de 0,25896 m. Para T01 se obtienen 6,446 km de cable monopolar, 4,256 km de ductos y 4 puntos de empalme trifásico.

Resultado. La ruta T01 cumple los criterios mecánicos de ocupación, halado, presión lateral y radio de curvatura con los ángulos reales del trazado y la distribución final de cámaras.

3.3. Resumen final de la ruta

Cuadro 8
Resumen de resultados mecánicos de la ruta T01

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total	2.086,091	m
Llenado del ducto	6,015	%
Relación de atoramiento J	7,062095	p.u.
Factor de peso triangular	1,036282	p.u.
Factor de peso cuna/V	1,013890	p.u.
Peso total de tres cables	2,100	kgf/m
Tensión máxima permisible	611,830	kgf
Longitud mecánica posible	544,858	m
Máxima separación real entre cámaras	78,095	m

Dato	Resultado	Unidad
Secciones de tiro	45	und
Cámaras interiores	44	und
Cámaras por cambio de dirección	41	und
Cámaras de paso adicionales	3	und
Cámaras que alojan empalme MT	4	und
Ángulo máximo real	19,381	grados
Tensión en recta	87,694	kgf
Tensión a la salida de curva real	104,418	kgf
Utilización de halado	17,066	%
Radio mínimo de diseño	0,25896	m
Radio instalado de diseño	1,000	m
Presión lateral triangular	38,594	kgf/m
Presión lateral cuna/V	52,934	kgf/m
Presión lateral de diseño	52,934	kgf/m
Longitud total de cable monopolar	6.446,020	m
Longitud total de ductos	4.255,625	m
Empalmes tripolares por carretes	4	und
Estado mecánico	Cumple	

4. Ruta T02: Punto Y - Orión

La ruta T02 tiene una longitud georreferenciada de 2.436,876 m. Para esta ruta se utilizan las propiedades generales del cable de cobre 2 AWG, el ducto PVC DB nominal de 6 in, el coeficiente de fricción y el radio instalado de diseño definidos en la metodología. La geometría proviene del archivo KMZ y los resultados se coordinan con el libro consolidado de cálculo [10, 11].

4.1. Datos tomados para la ruta

Cuadro 9
Datos de entrada mecánicos de la ruta T02

Dato	Valor	Unidad
Longitud de ruta	2.436,876	m
Tramo	T01	
Conductor	Cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, 15 kV, 100 %	
Diámetro exterior del cable	21,58	mm
Masa lineal por cable	700	kg/km
Ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Diámetro usado en la verificación geométrica	152,4	mm
Número de cables de potencia en el ducto	3	und
Coeficiente de fricción	0,516	p.u.
Cámaras por cambio de dirección	19	und
Cámaras de paso adicionales	22	und
Máxima separación real entre cámaras	79,861	m
Ángulo máximo real de la ruta	78,324	grados
Radio instalado de diseño	1,000	m

Fuente: libro de cálculo consolidado [10] y geometría KMZ del proyecto [11].

4.2. Desarrollo mecánico y de instalación

4.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso

$$F_{\text{llenado}} = 3\left(\frac{21{,}58}{152{,}4}\right)^2 100 = 6{,}015\,\%,$$

$$J = \frac{152.4}{21{,}58} = 7{,}062095,$$

$$\omega_{3a} = 1{,}036282,$$

$$\omega_{3t} = 1{,}013890,$$

$$\omega = 1{,}036282.$$

Fuente de la ecuación: aplicación de las ecuaciones generales; ocupación según NTC 2050 y relaciones mecánicas de ESSA NTR-02 [2, 4].

Resultado. La ocupación de la terna de potencia es 6,015 %, inferior al límite de 40 %.

4.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro

$$
\begin{aligned}
T_{\text{máx,NTR}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx,fab}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
L_{\text{máx,mec}} &= 544{,}858\,\text{m},\\
L_{\text{tiro},T02} &= \text{mín}(544{,}858, 79{,}861, 500) = 79{,}861\,\text{m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02 [4]; datos mecánicos de Nexans/Centelsa [6]; separación real conforme a la distribución final de cámaras [10].

Resultado. La sección más exigente de la ruta es 79,861 m, inferior a 80 m y muy inferior a la longitud mecánica posible de 544,858 m.

4.2.3. Número de secciones y cámaras interiores

$$
\begin{aligned}
N_{\text{cam,int},T02} &= N_{\text{dir},T02} + N_{\text{paso},T02} = 19 + 22 = 41,\\
N_{\text{sec},T02} &= N_{\text{cam,int},T02} + 1 = 42.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: Ecuaciones (23)–(25)*; ENERCA NR-MMD-PEG-01 versión 01, numeral 1.7.2(e) [3].*

Resultado. La ruta contiene 19 cámaras por cambio de dirección y 22 cámaras de paso adicionales, para 41 cámaras interiores y 42 secciones de tiro. Los 5 empalmes trifásicos se alojan en cámaras ya contabilizadas.

4.2.4. Tensión de halado y presión lateral

Para la envolvente de verificación se emplean la máxima separación real y el ángulo máximo real de la ruta. Esta combinación evalúa simultáneamente las dos condiciones más exigentes registradas

para la ruta.

$$
\begin{aligned}
T_{\text{recta},T02} &= 1{,}036282(0{,}516)(79{,}861)(2{,}100) = 89{,}677\,\text{kgf},\\
T_{\text{sal},T02} &= 89{,}677 e^{0{,}516\,\text{rad}(78{,}324^\circ)} = 181{,}562\,\text{kgf},\\
U_{T,T02} &= \frac{181{,}562}{611{,}830}100 = 29{,}675\,\%,\\
P_{L,a,T02} &= 67{,}108\,\text{kgf/m},\\
P_{L,t,T02} &= 92{,}042\,\text{kgf/m},\\
P_{L,\text{diseño},T02} &= 92{,}042\,\text{kgf/m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: tensión recta y presión lateral: ESSA NTR-02 [4]; incremento en curva: Euler–Eytelwein [12, 13]; ángulo real: geometría KMZ [11].

Resultado. La utilización de halado es 29,675 % y la presión lateral de diseño es 92,042 kgf/m; ambos resultados están por debajo de sus límites de verificación.

4.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación

$$
\begin{aligned}
R_{\text{mín}} &= 12(0{,}02158) = 0{,}25896\,\text{m} < R_{\text{inst}} = 1\,\text{m},\\
L_{\text{cable},T02} &= 2.436{,}876(3)(1{,}03) = 7.529{,}948\,\text{m},\\
L_{\text{ducto},T02} &= 2.436{,}876(2)(1{,}02) = 4.971{,}228\,\text{m},\\
N_{\text{emp},T02} &= 5.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: radio mínimo: ESSA NTR-02 y NTC 2050 artículo 300.34 [4, 2]; cantidades y plan de carretes: modelo del proyecto [10].

Resultado. El radio instalado de 1 m supera el mínimo de 0,25896 m. Para T02 se obtienen 7,530 km de cable monopolar, 4,971 km de ductos y 5 puntos de empalme trifásico.

Resultado. La ruta T02 cumple los criterios mecánicos de ocupación, halado, presión lateral y radio de curvatura con los ángulos reales del trazado y la distribución final de cámaras.

4.3. Resumen final de la ruta

Cuadro 10
Resumen de resultados mecánicos de la ruta T02

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total	2.436,876	m
Tramo	T01	
Llenado del ducto	6,015	%
Relación de atoramiento J	7,062095	p.u.
Factor de peso triangular	1,036282	p.u.
Factor de peso cuna/V	1,013890	p.u.
Peso total de tres cables	2,100	kgf/m
Tensión máxima permisible	611,830	kgf
Longitud mecánica posible	544,858	m
Máxima separación real entre cámaras	79,861	m
Secciones de tiro	42	und
Cámaras interiores	41	und
Cámaras por cambio de dirección	19	und
Cámaras de paso adicionales	22	und
Cámaras que alojan empalme MT	5	und
Ángulo máximo real	78,324	grados
Tensión en recta	89,677	kgf
Tensión a la salida de curva real	181,562	kgf
Utilización de halado	29,675	%
Radio mínimo de diseño	0,25896	m
Radio instalado de diseño	1,000	m
Presión lateral triangular	67,108	kgf/m
Presión lateral cuna/V	92,042	kgf/m
Presión lateral de diseño	92,042	kgf/m
Longitud total de cable monopolar	7.529,948	m

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total de ductos	4.971,228	m
Empalmes tripolares por carretes	5	und
Estado mecánico	Cumple	

5. Ruta T03: Orión - La Ponderosa

La ruta T03 tiene una longitud georreferenciada de 2.792,051 m. Para esta ruta se utilizan las propiedades generales del cable de cobre 2 AWG, el ducto PVC DB nominal de 6 in, el coeficiente de fricción y el radio instalado de diseño definidos en la metodología. La geometría proviene del archivo KMZ y los resultados se coordinan con el libro consolidado de cálculo [10, 11].

5.1. Datos tomados para la ruta

Cuadro 11
Datos de entrada mecánicos de la ruta T03

Dato	Valor	Unidad
Longitud de ruta	2.792,051	m
Tramo	T02	
Conductor	Cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, 15 kV, 100 %	
Diámetro exterior del cable	21,58	mm
Masa lineal por cable	700	kg/km
Ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Diámetro usado en la verificación geométrica	152,4	mm
Número de cables de potencia en el ducto	3	und
Coeficiente de fricción	0,516	p.u.
Cámaras por cambio de dirección	50	und
Cámaras de paso adicionales	9	und
Máxima separación real entre cámaras	78,492	m
Ángulo máximo real de la ruta	83,269	grados
Radio instalado de diseño	1,000	m

Fuente: libro de cálculo consolidado [10] y geometría KMZ del proyecto [11].

5.2. Desarrollo mecánico y de instalación

5.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso

$$
\begin{aligned}
F_{\text{llenado}} &= 3\left(\frac{21{,}58}{152{,}4}\right)^2 100 = 6{,}015\,\%,\\
J &= \frac{152.4}{21{,}58} = 7{,}062095,\\
\omega_{3a} &= 1{,}036282,\\
\omega_{3t} &= 1{,}013890,\\
\omega &= 1{,}036282.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: aplicación de las ecuaciones generales; ocupación según NTC 2050 y relaciones mecánicas de ESSA NTR-02 [2, 4].

Resultado. La ocupación de la terna de potencia es 6,015 %, inferior al límite de 40 %.

5.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro

$$
\begin{aligned}
T_{\text{máx,NTR}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx,fab}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
L_{\text{máx,mec}} &= 544{,}858\,\text{m},\\
L_{\text{tiro},T03} &= \text{mín}(544{,}858, 78{,}492, 500) = 78{,}492\,\text{m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02 [4]; datos mecánicos de Nexans/Centelsa [6]; separación real conforme a la distribución final de cámaras [10].

Resultado. La sección más exigente de la ruta es 78,492 m, inferior a 80 m y muy inferior a la longitud mecánica posible de 544,858 m.

5.2.3. Número de secciones y cámaras interiores

$$N_{\text{cam,int},T03} = N_{\text{dir},T03} + N_{\text{paso},T03} = 50 + 9 = 59,$$
$$N_{\text{sec},T03} = N_{\text{cam,int},T03} + 1 = 60.$$

Fuente de la ecuación: Ecuaciones (23)–(25)*; ENERCA NR-MMD-PEG-01 versión 01, numeral 1.7.2(e) [3].*

Resultado. La ruta contiene 50 cámaras por cambio de dirección y 9 cámaras de paso adicionales, para 59 cámaras interiores y 60 secciones de tiro. Los 5 empalmes trifásicos se alojan en cámaras ya contabilizadas.

5.2.4. Tensión de halado y presión lateral

Para la envolvente de verificación se emplean la máxima separación real y el ángulo máximo real de la ruta. Esta combinación evalúa simultáneamente las dos condiciones más exigentes registradas para la ruta.

$$T_{\text{recta},T03} = 1{,}036282(0{,}516)(78{,}492)(2{,}100) = 88{,}140\,\text{kgf},$$
$$T_{\text{sal},T03} = 88{,}140 e^{0{,}516\,\text{rad}(83{,}269^\circ)} = 186{,}576\,\text{kgf},$$
$$U_{T,T03} = \frac{186{,}576}{611{,}830}100 = 30{,}495\,\%,$$
$$P_{L,a,T03} = 68{,}961\,\text{kgf/m},$$
$$P_{L,t,T03} = 94{,}584\,\text{kgf/m},$$
$$P_{L,\text{diseño},T03} = 94{,}584\,\text{kgf/m}.$$

Fuente de la ecuación: tensión recta y presión lateral: ESSA NTR-02 [4]; incremento en curva: Euler–Eytelwein [12, 13]; ángulo real: geometría KMZ [11].

Resultado. La utilización de halado es 30,495 % y la presión lateral de diseño es 94,584 kgf/m; ambos resultados están por debajo de sus límites de verificación.

5.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación

$$R_{\text{mín}} = 12(0{,}02158) = 0{,}25896\,\text{m} < R_{\text{inst}} = 1\,\text{m},$$
$$L_{\text{cable},T03} = 2.792{,}051(3)(1{,}03) = 8.627{,}438\,\text{m},$$
$$L_{\text{ducto},T03} = 2.792{,}051(2)(1{,}02) = 5.695{,}784\,\text{m},$$
$$N_{\text{emp},T03} = 5.$$

Fuente de la ecuación: radio mínimo: ESSA NTR-02 y NTC 2050 artículo 300.34 [4, 2]; cantidades y plan de carretes: modelo del proyecto [10].

Resultado. El radio instalado de 1 m supera el mínimo de 0,25896 m. Para T03 se obtienen 8,627 km de cable monopolar, 5,696 km de ductos y 5 puntos de empalme trifásico.

Resultado. La ruta T03 cumple los criterios mecánicos de ocupación, halado, presión lateral y radio de curvatura con los ángulos reales del trazado y la distribución final de cámaras.

5.3. Resumen final de la ruta

Cuadro 12
Resumen de resultados mecánicos de la ruta T03

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total	2.792,051	m
Tramo	T02	
Llenado del ducto	6,015	%
Relación de atoramiento J	7,062095	p.u.
Factor de peso triangular	1,036282	p.u.
Factor de peso cuna/V	1,013890	p.u.
Peso total de tres cables	2,100	kgf/m
Tensión máxima permisible	611,830	kgf
Longitud mecánica posible	544,858	m

Dato	Resultado	Unidad
Máxima separación real entre cámaras	78,492	m
Secciones de tiro	60	und
Cámaras interiores	59	und
Cámaras por cambio de dirección	50	und
Cámaras de paso adicionales	9	und
Cámaras que alojan empalme MT	5	und
Ángulo máximo real	83,269	grados
Tensión en recta	88,140	kgf
Tensión a la salida de curva real	186,576	kgf
Utilización de halado	30,495	%
Radio mínimo de diseño	0,25896	m
Radio instalado de diseño	1,000	m
Presión lateral triangular	68,961	kgf/m
Presión lateral cuna/V	94,584	kgf/m
Presión lateral de diseño	94,584	kgf/m
Longitud total de cable monopolar	8.627,438	m
Longitud total de ductos	5.695,784	m
Empalmes tripolares por carretes	5	und
Estado mecánico	Cumple	

6. Ruta T04: La Ponderosa - El Zafiro

La ruta T04 tiene una longitud georreferenciada de 1.396,510 m. Para esta ruta se utilizan las propiedades generales del cable de cobre 2 AWG, el ducto PVC DB nominal de 6 in, el coeficiente de fricción y el radio instalado de diseño definidos en la metodología. La geometría proviene del archivo KMZ y los resultados se coordinan con el libro consolidado de cálculo [10, 11].

6.1. Datos tomados para la ruta

Cuadro 13
Datos de entrada mecánicos de la ruta T04

Dato	Valor	Unidad
Longitud de ruta	1.396,510	m
Tramo	T03	
Conductor	Cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, 15 kV, 100 %	
Diámetro exterior del cable	21,58	mm
Masa lineal por cable	700	kg/km
Ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Diámetro usado en la verificación geométrica	152,4	mm
Número de cables de potencia en el ducto	3	und
Coeficiente de fricción	0,516	p.u.
Cámaras por cambio de dirección	25	und
Cámaras de paso adicionales	2	und
Máxima separación real entre cámaras	75,517	m
Ángulo máximo real de la ruta	48,870	grados
Radio instalado de diseño	1,000	m

Fuente: libro de cálculo consolidado [10] y geometría KMZ del proyecto [11].

6.2. Desarrollo mecánico y de instalación

6.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso

$$F_{\text{llenado}} = 3\left(\frac{21{,}58}{152{,}4}\right)^2 100 = 6{,}015\,\%,$$

$$J = \frac{152.4}{21{,}58} = 7{,}062095,$$

$$\omega_{3a} = 1{,}036282,$$

$$\omega_{3t} = 1{,}013890,$$

$$\omega = 1{,}036282.$$

Fuente de la ecuación: aplicación de las ecuaciones generales; ocupación según NTC 2050 y relaciones mecánicas de ESSA NTR-02 [2, 4].

Resultado. La ocupación de la terna de potencia es 6,015 %, inferior al límite de 40 %.

6.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro

$$
\begin{aligned}
T_{\text{máx,NTR}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx,fab}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
L_{\text{máx,mec}} &= 544{,}858\,\text{m},\\
L_{\text{tiro},T04} &= \text{mín}(544{,}858, 75{,}517, 500) = 75{,}517\,\text{m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02 [4]; datos mecánicos de Nexans/Centelsa [6]; separación real conforme a la distribución final de cámaras [10].

Resultado. La sección más exigente de la ruta es 75,517 m, inferior a 80 m y muy inferior a la longitud mecánica posible de 544,858 m.

6.2.3. Número de secciones y cámaras interiores

$$
\begin{aligned}
N_{\text{cam,int},T04} &= N_{\text{dir},T04} + N_{\text{paso},T04} = 25 + 2 = 27,\\
N_{\text{sec},T04} &= N_{\text{cam,int},T04} + 1 = 28.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: Ecuaciones (23)–(25)*; ENERCA NR-MMD-PEG-01 versión 01, numeral 1.7.2(e) [3].*

Resultado. La ruta contiene 25 cámaras por cambio de dirección y 2 cámaras de paso adicionales, para 27 cámaras interiores y 28 secciones de tiro. Los 2 empalmes trifásicos se alojan en cámaras ya contabilizadas.

6.2.4. Tensión de halado y presión lateral

Para la envolvente de verificación se emplean la máxima separación real y el ángulo máximo real de la ruta. Esta combinación evalúa simultáneamente las dos condiciones más exigentes registradas

para la ruta.

$$
\begin{aligned}
T_{\text{recta},T04} &= 1{,}036282(0{,}516)(75{,}517)(2{,}100) = 84{,}800\,\text{kgf},\\
T_{\text{sal},T04} &= 84{,}800e^{0{,}516\,\text{rad}(48{,}870^\circ)} = 131{,}684\,\text{kgf},\\
U_{T,T04} &= \frac{131{,}684}{611{,}830}100 = 21{,}523\,\%,\\
P_{L,a,T04} &= 48{,}672\,\text{kgf/m},\\
P_{L,t,T04} &= 66{,}757\,\text{kgf/m},\\
P_{L,\text{diseño},T04} &= 66{,}757\,\text{kgf/m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: tensión recta y presión lateral: ESSA NTR-02 [4]; incremento en curva: Euler–Eytelwein [12, 13]; ángulo real: geometría KMZ [11].

Resultado. La utilización de halado es 21,523 % y la presión lateral de diseño es 66,757 kgf/m; ambos resultados están por debajo de sus límites de verificación.

6.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación

$$
\begin{aligned}
R_{\text{mín}} &= 12(0{,}02158) = 0{,}25896\,\text{m} < R_{\text{inst}} = 1\,\text{m},\\
L_{\text{cable},T04} &= 1.396{,}510(3)(1{,}03) = 4.315{,}215\,\text{m},\\
L_{\text{ducto},T04} &= 1.396{,}510(2)(1{,}02) = 2.848{,}880\,\text{m},\\
N_{\text{emp},T04} &= 2.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: radio mínimo: ESSA NTR-02 y NTC 2050 artículo 300.34 [4, 2]; cantidades y plan de carretes: modelo del proyecto [10].

Resultado. El radio instalado de 1 m supera el mínimo de 0,25896 m. Para T04 se obtienen 4,315 km de cable monopolar, 2,849 km de ductos y 2 puntos de empalme trifásico.

Resultado. La ruta T04 cumple los criterios mecánicos de ocupación, halado, presión lateral y radio de curvatura con los ángulos reales del trazado y la distribución final de cámaras.

6.3. Resumen final de la ruta

Cuadro 14
Resumen de resultados mecánicos de la ruta T04

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total	1.396,510	m
Tramo	T03	
Llenado del ducto	6,015	%
Relación de atoramiento J	7,062095	p.u.
Factor de peso triangular	1,036282	p.u.
Factor de peso cuna/	1,013890	p.u.
Peso total de tres cables	2,100	kgf/m
Tensión máxima permisible	611,830	kgf
Longitud mecánica posible	544,858	m
Máxima separación real entre cámaras	75,517	m
Secciones de tiro	28	und
Cámaras interiores	27	und
Cámaras por cambio de dirección	25	und
Cámaras de paso adicionales	2	und
Cámaras que alojan empalme MT	2	und
Ángulo máximo real	48,870	grados
Tensión en recta	84,800	kgf
Tensión a la salida de curva real	131,684	kgf
Utilización de halado	21,523	%
Radio mínimo de diseño	0,25896	m
Radio instalado de diseño	1,000	m
Presión lateral triangular	48,672	kgf/m
Presión lateral cuna/V	66,757	kgf/m
Presión lateral de diseño	66,757	kgf/m
Longitud total de cable monopolar	4.315,215	m

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total de ductos	2.848,880	m
Empalmes tripolares por carretes	2	und
Estado mecánico	Cumple	

7. Ruta T05: Punto Y - El Oasis

La ruta T05 tiene una longitud georreferenciada de 1.248,674 m. Para esta ruta se utilizan las propiedades generales del cable de cobre 2 AWG, el ducto PVC DB nominal de 6 in, el coeficiente de fricción y el radio instalado de diseño definidos en la metodología. La geometría proviene del archivo KMZ y los resultados se coordinan con el libro consolidado de cálculo [10, 11].

7.1. Datos tomados para la ruta

Cuadro 15
Datos de entrada mecánicos de la ruta T05

Dato	Valor	Unidad
Longitud de ruta	1.248,674	m
Tramo	T01	
Conductor	Cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, 15 kV, 100 %	
Diámetro exterior del cable	21,58	mm
Masa lineal por cable	700	kg/km
Ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Diámetro usado en la verificación geométrica	152,4	mm
Número de cables de potencia en el ducto	3	und
Coeficiente de fricción	0,516	p.u.
Cámaras por cambio de dirección	10	und
Cámaras de paso adicionales	10	und
Máxima separación real entre cámaras	78,641	m
Ángulo máximo real de la ruta	37,358	grados
Radio instalado de diseño	1,000	m

Fuente: libro de cálculo consolidado [10] y geometría KMZ del proyecto [11].

7.2. Desarrollo mecánico y de instalación

7.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso

$$
\begin{aligned}
F_{\text{llenado}} &= 3\left(\frac{21{,}58}{152{,}4}\right)^2 100 = 6{,}015\,\%,\\
J &= \frac{152.4}{21{,}58} = 7{,}062095,\\
\omega_{3a} &= 1{,}036282,\\
\omega_{3t} &= 1{,}013890,\\
\omega &= 1{,}036282.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: aplicación de las ecuaciones generales; ocupación según NTC 2050 y relaciones mecánicas de ESSA NTR-02 [2, 4].

Resultado. La ocupación de la terna de potencia es 6,015 %, inferior al límite de 40 %.

7.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro

$$
\begin{aligned}
T_{\text{máx,NTR}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx,fab}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
L_{\text{máx,mec}} &= 544{,}858\,\text{m},\\
L_{\text{tiro},T05} &= \text{mín}(544{,}858, 78{,}641, 500) = 78{,}641\,\text{m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02 [4]; datos mecánicos de Nexans/Centelsa [6]; separación real conforme a la distribución final de cámaras [10].

Resultado. La sección más exigente de la ruta es 78,641 m, inferior a 80 m y muy inferior a la longitud mecánica posible de 544,858 m.

7.2.3. Número de secciones y cámaras interiores

$$N_{\mathrm{cam,int},T05} = N_{\mathrm{dir},T05} + N_{\mathrm{paso},T05} = 10 + 10 = 20,$$
$$N_{\mathrm{sec},T05} = N_{\mathrm{cam,int},T05} + 1 = 21.$$

Fuente de la ecuación: Ecuaciones (23)–(25)*; ENERCA NR-MMD-PEG-01 versión 01, numeral 1.7.2(e) [3].*

Resultado. La ruta contiene 10 cámaras por cambio de dirección y 10 cámaras de paso adicionales, para 20 cámaras interiores y 21 secciones de tiro. Los 2 empalmes trifásicos se alojan en cámaras ya contabilizadas.

7.2.4. Tensión de halado y presión lateral

Para la envolvente de verificación se emplean la máxima separación real y el ángulo máximo real de la ruta. Esta combinación evalúa simultáneamente las dos condiciones más exigentes registradas para la ruta.

$$T_{\mathrm{recta},T05} = 1{,}036282(0{,}516)(78{,}641)(2{,}100) = 88{,}307\,\mathrm{kgf},$$
$$T_{\mathrm{sal},T05} = 88{,}307 e^{0{,}516\,\mathrm{rad}(37{,}358^\circ)} = 123{,}626\,\mathrm{kgf},$$
$$U_{T,T05} = \frac{123{,}626}{611{,}830}100 = 20{,}206\,\%,$$
$$P_{L,a,T05} = 45{,}694\,\mathrm{kgf/m},$$
$$P_{L,t,T05} = 62{,}671\,\mathrm{kgf/m},$$
$$P_{L,\mathrm{diseño},T05} = 62{,}671\,\mathrm{kgf/m}.$$

Fuente de la ecuación: tensión recta y presión lateral: ESSA NTR-02 [4]; incremento en curva: Euler–Eytelwein [12, 13]; ángulo real: geometría KMZ [11].

Resultado. La utilización de halado es 20,206 % y la presión lateral de diseño es 62,671 kgf/m; ambos resultados están por debajo de sus límites de verificación.

7.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación

$$R_{\text{mín}} = 12(0{,}02158) = 0{,}25896\,\text{m} < R_{\text{inst}} = 1\,\text{m},$$

$$L_{\text{cable},T05} = 1.248{,}674(3)(1{,}03) = 3.858{,}401\,\text{m},$$

$$L_{\text{ducto},T05} = 1.248{,}674(2)(1{,}02) = 2.547{,}294\,\text{m},$$

$$N_{\text{emp},T05} = 2.$$

Fuente de la ecuación: radio mínimo: ESSA NTR-02 y NTC 2050 artículo 300.34 [4, 2]; cantidades y plan de carretes: modelo del proyecto [10].

Resultado. El radio instalado de 1 m supera el mínimo de 0,25896 m. Para T05 se obtienen 3,858 km de cable monopolar, 2,547 km de ductos y 2 puntos de empalme trifásico.

Resultado. La ruta T05 cumple los criterios mecánicos de ocupación, halado, presión lateral y radio de curvatura con los ángulos reales del trazado y la distribución final de cámaras.

7.3. Resumen final de la ruta

Cuadro 16
Resumen de resultados mecánicos de la ruta T05

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total	1.248,674	m
Tramo	T01	
Llenado del ducto	6,015	%
Relación de atoramiento J	7,062095	p.u.
Factor de peso triangular	1,036282	p.u.
Factor de peso cuna/V	1,013890	p.u.
Peso total de tres cables	2,100	kgf/m
Tensión máxima permisible	611,830	kgf
Longitud mecánica posible	544,858	m

Dato	Resultado	Unidad
Máxima separación real entre cámaras	78,641	m
Secciones de tiro	21	und
Cámaras interiores	20	und
Cámaras por cambio de dirección	10	und
Cámaras de paso adicionales	10	und
Cámaras que alojan empalme MT	2	und
Ángulo máximo real	37,358	grados
Tensión en recta	88,307	kgf
Tensión a la salida de curva real	123,626	kgf
Utilización de halado	20,206	%
Radio mínimo de diseño	0,25896	m
Radio instalado de diseño	1,000	m
Presión lateral triangular	45,694	kgf/m
Presión lateral cuna/V	62,671	kgf/m
Presión lateral de diseño	62,671	kgf/m
Longitud total de cable monopolar	3.858,401	m
Longitud total de ductos	2.547,294	m
Empalmes tripolares por carretes	2	und
Estado mecánico	Cumple	

8. Ruta T06: El Oasis - Antares

La ruta T06 tiene una longitud georreferenciada de 4.677,746 m. Para esta ruta se utilizan las propiedades generales del cable de cobre 2 AWG, el ducto PVC DB nominal de 6 in, el coeficiente de fricción y el radio instalado de diseño definidos en la metodología. La geometría proviene del archivo KMZ y los resultados se coordinan con el libro consolidado de cálculo [10, 11].

8.1. Datos tomados para la ruta

Cuadro 17
Datos de entrada mecánicos de la ruta T06

Dato	Valor	Unidad
Longitud de ruta	4.677,746	m
Tramo	T05	
Conductor	Cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, 15 kV, 100 %	
Diámetro exterior del cable	21,58	mm
Masa lineal por cable	700	kg/km
Ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Diámetro usado en la verificación geométrica	152,4	mm
Número de cables de potencia en el ducto	3	und
Coeficiente de fricción	0,516	p.u.
Cámaras por cambio de dirección	33	und
Cámaras de paso adicionales	38	und
Máxima separación real entre cámaras	79,518	m
Ángulo máximo real de la ruta	36,475	grados
Radio instalado de diseño	1,000	m

Fuente: libro de cálculo consolidado [10] y geometría KMZ del proyecto [11].

8.2. Desarrollo mecánico y de instalación

8.2.1. Llenado, atoramiento y factores de peso

$$F_{\text{llenado}} = 3\left(\frac{21{,}58}{152{,}4}\right)^2 100 = 6{,}015\,\%,$$

$$J = \frac{152.4}{21{,}58} = 7{,}062095,$$

$$\omega_{3a} = 1{,}036282,$$

$$\omega_{3t} = 1{,}013890,$$

$$\omega = 1{,}036282.$$

Fuente de la ecuación: aplicación de las ecuaciones generales; ocupación según NTC 2050 y relaciones mecánicas de ESSA NTR-02 [2, 4].

Resultado. La ocupación de la terna de potencia es 6,015 %, inferior al límite de 40 %.

8.2.2. Tensión máxima y longitud de tiro

$$
\begin{aligned}
T_{\text{máx,NTR}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx,fab}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
T_{\text{máx}} &= 611{,}830\,\text{kgf},\\
L_{\text{máx,mec}} &= 544{,}858\,\text{m},\\
L_{\text{tiro},T06} &= \text{mín}(544{,}858, 79{,}518, 500) = 79{,}518\,\text{m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: ESSA NTR-02 [4]; datos mecánicos de Nexans/Centelsa [6]; separación real conforme a la distribución final de cámaras [10].

Resultado. La sección más exigente de la ruta es 79,518 m, inferior a 80 m y muy inferior a la longitud mecánica posible de 544,858 m.

8.2.3. Número de secciones y cámaras interiores

$$
\begin{aligned}
N_{\text{cam,int},T06} &= N_{\text{dir},T06} + N_{\text{paso},T06} = 33 + 38 = 71,\\
N_{\text{sec},T06} &= N_{\text{cam,int},T06} + 1 = 72.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: Ecuaciones (23)–(25)*; ENERCA NR-MMD-PEG-01 versión 01, numeral 1.7.2(e) [3].*

Resultado. La ruta contiene 33 cámaras por cambio de dirección y 38 cámaras de paso adicionales, para 71 cámaras interiores y 72 secciones de tiro. Los 9 empalmes trifásicos se alojan en cámaras ya contabilizadas.

8.2.4. Tensión de halado y presión lateral

Para la envolvente de verificación se emplean la máxima separación real y el ángulo máximo real de la ruta. Esta combinación evalúa simultáneamente las dos condiciones más exigentes registradas

para la ruta.

$$
\begin{aligned}
T_{\text{recta},T06} &= 1{,}036282(0{,}516)(79{,}518)(2{,}100) = 89{,}292\,\text{kgf},\\
T_{\text{sal},T06} &= 89{,}292e^{0{,}516\,\text{rad}(36{,}475^\circ)} = 124{,}016\,\text{kgf},\\
U_{T,T06} &= \frac{124{,}016}{611{,}830}100 = 20{,}270\,\%,\\
P_{L,a,T06} &= 45{,}838\,\text{kgf/m},\\
P_{L,t,T06} &= 62{,}869\,\text{kgf/m},\\
P_{L,\text{diseño},T06} &= 62{,}869\,\text{kgf/m}.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: tensión recta y presión lateral: ESSA NTR-02 [4]; incremento en curva: Euler–Eytelwein [12, 13]; ángulo real: geometría KMZ [11].

Resultado. La utilización de halado es 20,270 % y la presión lateral de diseño es 62,869 kgf/m; ambos resultados están por debajo de sus límites de verificación.

8.2.5. Radio mínimo y cantidades de instalación

$$
\begin{aligned}
R_{\text{mín}} &= 12(0{,}02158) = 0{,}25896\,\text{m} < R_{\text{inst}} = 1\,\text{m},\\
L_{\text{cable},T06} &= 4.677{,}746(3)(1{,}03) = 14.454{,}235\,\text{m},\\
L_{\text{ducto},T06} &= 4.677{,}746(2)(1{,}02) = 9.542{,}602\,\text{m},\\
N_{\text{emp},T06} &= 9.
\end{aligned}
$$

Fuente de la ecuación: radio mínimo: ESSA NTR-02 y NTC 2050 artículo 300.34 [4, 2]; cantidades y plan de carretes: modelo del proyecto [10].

Resultado. El radio instalado de 1 m supera el mínimo de 0,25896 m. Para T06 se obtienen 14,454 km de cable monopolar, 9,543 km de ductos y 9 puntos de empalme trifásico.

Resultado. La ruta T06 cumple los criterios mecánicos de ocupación, halado, presión lateral y radio de curvatura con los ángulos reales del trazado y la distribución final de cámaras.

8.3. Resumen final de la ruta

Cuadro 18
Resumen de resultados mecánicos de la ruta T06

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total	4.677,746	m
Tramo	T05	
Llenado del ducto	6,015	%
Relación de atoramiento J	7,062095	p.u.
Factor de peso triangular	1,036282	p.u.
Factor de peso cuna/V	1,013890	p.u.
Peso total de tres cables	2,100	kgf/m
Tensión máxima permisible	611,830	kgf
Longitud mecánica posible	544,858	m
Máxima separación real entre cámaras	79,518	m
Secciones de tiro	72	und
Cámaras interiores	71	und
Cámaras por cambio de dirección	33	und
Cámaras de paso adicionales	38	und
Cámaras que alojan empalme MT	9	und
Ángulo máximo real	36,475	grados
Tensión en recta	89,292	kgf
Tensión a la salida de curva real	124,016	kgf
Utilización de halado	20,270	%
Radio mínimo de diseño	0,25896	m
Radio instalado de diseño	1,000	m
Presión lateral triangular	45,838	kgf/m
Presión lateral cuna/V	62,869	kgf/m
Presión lateral de diseño	62,869	kgf/m
Longitud total de cable monopolar	14.454,235	m

Dato	Resultado	Unidad
Longitud total de ductos	9.542,602	m
Empalmes tripolares por carretes	9	und
Estado mecánico	Cumple	

9. Registro de ángulos del trazado

El siguiente registro reúne los 178 vértices considerados en los cálculos. La abscisa se mide desde el inicio de cada ruta y las direcciones de entrada y salida se obtienen del trazado realizado en Google Earth. Con estos datos se calcula el ángulo de cambio de dirección mediante la Ecuación (16), considerando cada vértice como una cámara obligatoria según el criterio de ENERCA 1.7.2(e) [3, 11].

Cuadro 19
Vértices y ángulos reales de las seis rutas

ID	Abscisa [m]	Az. ent. [°]	Az. sal. [°]	Ángulo [°]	Giro
T01-V001	53,730	141,208	134,708	6,499	Izquierda
T01-V002	112,489	134,708	146,331	11,623	Derecha
T01-V003	190,584	146,331	139,888	6,443	Izquierda
T01-V004	242,810	139,888	137,995	1,893	Izquierda
T01-V005	285,765	137,995	118,615	19,381	Izquierda
T01-V006	341,395	118,615	122,696	4,081	Derecha
T01-V007	389,041	122,696	119,998	2,698	Izquierda
T01-V008	429,562	119,998	125,263	5,265	Derecha
T01-V009	489,755	125,263	143,228	17,964	Derecha
T01-V010	527,517	143,228	144,703	1,475	Derecha
T01-V011	584,661	144,703	146,563	1,860	Derecha
T01-V012	643,592	146,563	139,062	7,501	Izquierda
T01-V013	692,819	139,062	136,263	2,799	Izquierda
T01-V014	739,596	136,263	141,199	4,936	Derecha
T01-V015	792,184	141,199	137,382	3,817	Izquierda
T01-V016	836,763	137,382	141,291	3,910	Derecha
T01-V017	878,134	141,291	137,730	3,562	Izquierda
T01-V018	925,050	137,730	130,528	7,201	Izquierda
T01-V019	966,899	130,528	111,719	18,810	Izquierda
T01-V020	1.017,397	111,719	119,452	7,734	Derecha
T01-V021	1.046,466	119,452	104,405	15,047	Izquierda
T01-V022	1.084,839	104,405	89,160	15,246	Izquierda
T01-V023	1.131,847	89,160	83,757	5,403	Izquierda
T01-V024	1.182,958	83,757	76,725	7,032	Izquierda
T01-V025	1.227,273	76,725	90,657	13,933	Derecha
T01-V026	1.249,119	90,657	102,180	11,523	Derecha
T01-V027	1.301,658	102,180	98,789	3,391	Izquierda
T01-V028	1.347,516	98,789	98,234	0,555	Izquierda
T01-V029	1.396,951	98,234	83,044	15,190	Izquierda
T01-V030	1.464,666	83,044	83,081	0,037	Derecha
T01-V031	1.508,544	83,081	84,594	1,512	Derecha
T01-V032	1.551,482	84,594	87,390	2,796	Derecha
T01-V033	1.601,385	87,390	75,601	11,789	Izquierda
T01-V034	1.662,883	75,601	78,133	2,531	Derecha
T01-V035	1.709,205	78,133	75,097	3,035	Izquierda
T01-V036	1.761,245	75,097	77,349	2,252	Derecha
T01-V037	1.807,155	77,349	75,579	1,771	Izquierda

ID	Abscisa [m]	Az. ent. [°]	Az. sal. [°]	Ángulo [°]	Giro
T01-V038	1.917,846	75,579	89,979	14,401	Derecha
T01-V039	1.918,526	89,979	77,707	12,272	Izquierda
T01-V040	2.016,699	77,707	82,495	4,788	Derecha
T01-V041	2.063,146	82,495	97,584	15,089	Derecha
T02-V001	31,063	80,638	90,838	10,200	Derecha
T02-V002	115,595	90,838	88,953	1,886	Izquierda
T02-V003	195,457	88,953	90,964	2,011	Derecha
T02-V004	288,739	90,964	87,698	3,267	Izquierda
T02-V005	431,705	87,698	69,685	18,013	Izquierda
T02-V006	632,332	69,685	72,750	3,066	Derecha
T02-V007	678,729	72,750	79,786	7,035	Derecha
T02-V008	885,907	79,786	80,320	0,534	Derecha
T02-V009	1.221,517	80,320	80,109	0,211	Izquierda
T02-V010	1.432,626	80,109	99,236	19,127	Derecha
T02-V011	1.613,988	99,236	99,355	0,119	Derecha
T02-V012	1.897,776	99,355	177,679	78,324	Derecha
T02-V013	1.918,045	177,679	188,851	11,172	Derecha
T02-V014	1.990,819	188,851	181,122	7,730	Izquierda
T02-V015	2.039,856	181,122	162,381	18,740	Izquierda
T02-V016	2.102,220	162,381	142,937	19,445	Izquierda
T02-V017	2.153,391	142,937	140,688	2,248	Izquierda
T02-V018	2.260,794	140,688	149,277	8,589	Derecha
T02-V019	2.354,816	149,277	130,738	18,540	Izquierda
T03-V001	82,894	126,567	107,706	18,861	Izquierda
T03-V002	150,728	107,706	94,937	12,769	Izquierda
T03-V003	204,794	94,937	76,255	18,682	Izquierda
T03-V004	248,022	76,255	59,544	16,711	Izquierda
T03-V005	277,527	59,544	51,257	8,287	Izquierda
T03-V006	327,592	51,257	53,879	2,623	Derecha
T03-V007	375,917	53,879	63,292	9,413	Derecha
T03-V008	407,436	63,292	73,373	10,081	Derecha
T03-V009	423,272	73,373	92,884	19,510	Derecha
T03-V010	446,277	92,884	107,538	14,654	Derecha
T03-V011	479,089	107,538	108,179	0,641	Derecha
T03-V012	539,114	108,179	108,416	0,237	Derecha
T03-V013	672,838	108,416	120,219	11,803	Derecha
T03-V014	707,652	120,219	118,308	1,910	Izquierda
T03-V015	743,662	118,308	102,270	16,038	Izquierda
T03-V016	803,055	102,270	88,840	13,430	Izquierda
T03-V017	836,307	88,840	82,676	6,163	Izquierda
T03-V018	921,574	82,676	89,413	6,737	Derecha
T03-V019	922,567	89,413	74,965	14,448	Izquierda
T03-V020	1.026,681	74,965	67,403	7,562	Izquierda
T03-V021	1.086,126	67,403	28,528	38,875	Izquierda
T03-V022	1.150,616	28,528	31,386	2,857	Derecha
T03-V023	1.218,780	31,386	37,776	6,390	Derecha
T03-V024	1.297,273	37,776	36,484	1,292	Izquierda
T03-V025	1.395,923	36,484	39,253	2,769	Derecha
T03-V026	1.456,133	39,253	46,892	7,639	Derecha
T03-V027	1.548,579	46,892	49,884	2,991	Derecha
T03-V028	1.623,103	49,884	62,801	12,917	Derecha
T03-V029	1.656,444	62,801	102,783	39,982	Derecha
T03-V030	1.684,836	102,783	111,397	8,614	Derecha
T03-V031	1.731,091	111,397	141,519	30,122	Derecha
T03-V032	1.774,162	141,519	124,592	16,927	Izquierda
T03-V033	1.818,542	124,592	115,835	8,758	Izquierda
T03-V034	1.889,515	115,835	116,133	0,298	Derecha
T03-V035	1.946,434	116,133	122,338	6,206	Derecha
T03-V036	1.992,629	122,338	121,058	1,280	Izquierda
T03-V037	2.043,322	121,058	112,545	8,513	Izquierda
T03-V038	2.121,578	112,545	108,452	4,093	Izquierda
T03-V039	2.228,045	108,452	107,552	0,900	Izquierda
T03-V040	2.298,341	107,552	113,765	6,213	Derecha
T03-V041	2.341,899	113,765	109,795	3,970	Izquierda
T03-V042	2.401,926	109,795	117,807	8,012	Derecha
T03-V043	2.447,672	117,807	117,080	0,727	Izquierda
T03-V044	2.486,702	117,080	125,587	8,507	Derecha

ID	Abscisa [m]	Az. ent. [°]	Az. sal. [°]	Ángulo [°]	Giro
T03-V045	2.540,000	125,587	128,129	2,541	Derecha
T03-V046	2.587,409	128,129	132,429	4,301	Derecha
T03-V047	2.624,770	132,429	129,052	3,377	Izquierda
T03-V048	2.652,630	129,052	127,507	1,546	Izquierda
T03-V049	2.709,292	127,507	134,385	6,878	Derecha
T03-V050	2.737,081	134,385	217,654	83,269	Derecha
T04-V001	50,431	130,221	125,887	4,334	Izquierda
T04-V002	99,794	125,887	133,236	7,349	Derecha
T04-V003	152,046	133,236	123,258	9,978	Izquierda
T04-V004	211,448	123,258	127,226	3,968	Derecha
T04-V005	256,594	127,226	126,866	0,360	Izquierda
T04-V006	302,221	126,866	175,736	48,870	Derecha
T04-V007	354,612	175,736	136,957	38,779	Izquierda
T04-V008	380,248	136,957	112,569	24,389	Izquierda
T04-V009	437,936	112,569	103,085	9,484	Izquierda
T04-V010	489,471	103,085	103,088	0,003	Derecha
T04-V011	535,746	103,088	102,296	0,791	Izquierda
T04-V012	570,732	102,296	112,004	9,708	Derecha
T04-V013	642,600	112,004	106,212	5,792	Izquierda
T04-V014	715,585	106,212	103,419	2,794	Izquierda
T04-V015	784,030	103,419	98,682	4,737	Izquierda
T04-V016	865,839	98,682	96,362	2,320	Izquierda
T04-V017	926,207	96,362	91,769	4,592	Izquierda
T04-V018	995,137	91,769	97,995	6,226	Derecha
T04-V019	1.060,143	97,995	107,374	9,379	Derecha
T04-V020	1.094,782	107,374	114,560	7,186	Derecha
T04-V021	1.120,997	114,560	126,604	12,044	Derecha
T04-V022	1.196,514	126,604	128,068	1,464	Derecha
T04-V023	1.250,633	128,068	148,837	20,769	Derecha
T04-V024	1.273,264	148,837	124,079	24,758	Izquierda
T04-V025	1.324,342	124,079	111,758	12,321	Izquierda
T05-V001	100,346	158,682	154,767	3,915	Izquierda
T05-V002	257,628	154,767	157,817	3,049	Derecha
T05-V003	346,015	157,817	168,850	11,034	Derecha
T05-V004	490,974	168,850	170,144	1,293	Derecha
T05-V005	558,135	170,144	175,263	5,120	Derecha
T05-V006	594,111	175,263	170,177	5,086	Izquierda
T05-V007	618,058	170,177	161,702	8,476	Izquierda
T05-V008	826,325	161,702	161,495	0,207	Izquierda
T05-V009	1.060,846	161,495	173,038	11,543	Derecha
T05-V010	1.155,962	173,038	210,395	37,358	Derecha
T06-V001	79,518	156,796	133,167	23,629	Izquierda
T06-V002	126,041	133,167	114,399	18,768	Izquierda
T06-V003	173,186	114,399	119,276	4,876	Derecha
T06-V004	244,663	119,276	122,703	3,427	Derecha
T06-V005	301,499	122,703	130,395	7,692	Derecha
T06-V006	359,089	130,395	132,031	1,636	Derecha
T06-V007	416,320	132,031	159,095	27,064	Derecha
T06-V008	474,042	159,095	162,618	3,523	Derecha
T06-V009	528,002	162,618	171,318	8,700	Derecha
T06-V010	627,878	171,318	172,061	0,743	Derecha
T06-V011	741,861	172,061	178,395	6,334	Derecha
T06-V012	799,399	178,395	183,084	4,689	Derecha
T06-V013	926,981	183,084	175,641	7,443	Izquierda
T06-V014	1.001,006	175,641	156,277	19,364	Izquierda
T06-V015	1.059,011	156,277	148,155	8,122	Izquierda
T06-V016	1.111,618	148,155	157,676	9,521	Derecha
T06-V017	1.344,172	157,676	149,131	8,545	Izquierda
T06-V018	1.395,299	149,131	180,995	31,863	Derecha
T06-V019	1.688,488	180,995	174,001	6,993	Izquierda
T06-V020	1.765,807	174,001	160,415	13,586	Izquierda
T06-V021	1.828,625	160,415	123,940	36,475	Izquierda
T06-V022	1.940,027	123,940	114,093	9,847	Izquierda
T06-V023	2.004,966	114,093	130,368	16,275	Derecha
T06-V024	2.058,709	130,368	160,684	30,316	Derecha
T06-V025	2.134,667	160,684	153,867	6,817	Izquierda
T06-V026	2.246,353	153,867	164,377	10,509	Derecha

ID	Abscisa [m]	Az. ent. [°]	Az. sal. [°]	Ángulo [°]	Giro
T06-V027	2.352,402	164,377	143,512	20,865	Izquierda
T06-V028	2.407,884	143,512	135,063	8,448	Izquierda
T06-V029	3.209,855	135,063	133,249	1,814	Izquierda
T06-V030	3.691,833	133,249	132,832	0,417	Izquierda
T06-V031	4.163,704	132,832	140,503	7,671	Derecha
T06-V032	4.429,688	140,503	165,452	24,949	Derecha
T06-V033	4.577,137	165,452	177,722	12,269	Derecha

Fuente: vértices y azimutes extraídos de los archivos KMZ y consolidados en el libro de cálculo [11, 10].

10. Resumen general de las seis rutas

Cuadro 20

Resultados mecánicos y clasificación final de cámaras por ruta

Ruta	Descripción	Secc.	Cám. int.	Dir.	Paso	Áng. máx.	Halado [%]	P_L [kgf/m]	Cable [km]	Ductos [km]	Estado
T01	Punto de conexión - Punto Y	45	44	41	3	19,381	17,066	52,934	6,446	4,256	Cumple
T02	Punto Y - Orión	42	41	19	22	78,324	29,675	92,042	7,530	4,971	Cumple
T03	Orión - La Ponderosa	60	59	50	9	83,269	30,495	94,584	8,627	5,696	Cumple
T04	La Ponderosa - El Zafiro	28	27	25	2	48,870	21,523	66,757	4,315	2,849	Cumple
T05	Punto Y - El Oasis	21	20	10	10	37,358	20,206	62,671	3,858	2,547	Cumple
T06	El Oasis - Antares	72	71	33	38	36,475	20,270	62,869	14,454	9,543	Cumple

Cuadro 21

Resultados generales del cálculo mecánico

Indicador	Resultado	Unidad
Longitud total de rutas	14,638	km
Cable seleccionado	Cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, 15 kV, 100 %	
Ducto MT	PVC DB, 6 in nominal	
Diámetro exterior nominal del cable	21,580	mm
Masa lineal por cable	700,000	kg/km
Llenado del ducto	6,015	%
Relación de atoramiento	7,062095	p.u.
Tensión máxima permisible	611,830	kgf
Longitud mecánica posible	544,858	m
Máxima separación real entre cámaras	79,861	m
Utilización máxima de halado	30,495	%
Radio mínimo de diseño	0,25896	m
Presión lateral máxima	94,584	kgf/m
Cámaras físicas finales	269	und
Puntos singulares de nodo	7	und
Cámaras por cambio de dirección	178	und
Cámaras de paso adicionales	84	und
Cámaras que alojan empalme MT	27	und
Longitud total de cable monopolar	45,231	km
Longitud total de ductos	29,861	km
Empalmes tripolares	27	und
Operaciones de transición A-S	4	und
Operaciones de transición S-A	5	und
Transformadores en poste	5	und
Estado mecánico	Cumple	

Fuente: libro consolidado de cálculo [10].

11. Criterios finales del diseño

1. El conductor de media tensión se mantiene en cobre 2 AWG Nexans/Centelsa, XLPE, clase 15 kV, aislamiento 100 %. Este calibre coincide con el mínimo de 2 AWG exigido por ENERCA para redes subterráneas de 13,2 kV [3].

2. La canalización MT se define en PVC DB nominal de 6 in, con un circuito trifásico por ducto, conforme al numeral 1.7.2(a)-(b) de ENERCA [3].

3. La terna ocupa 6,015 % del área geométrica utilizada en la verificación, por debajo del límite de 40 %.

4. La tensión máxima permisible de la terna es 611,830 kgf y la longitud mecánica posible es 544,858 m.

5. Los 178 vértices del KMZ se mantienen como puntos de cámara para el criterio de halado. Se agregan 84 cámaras de paso para que la separación en tramos rectos sea como máximo 80 m.

6. La máxima separación real es 79,861 m, por lo que la distribución satisface el numeral 1.7.2(e) de ENERCA.

7. La presión lateral máxima es 94,584 kgf/m y el radio mínimo es 0,25896 m, frente a un radio instalado de diseño de 1 m.

8. La distribución final contiene 269 cámaras físicas: 7 nodos, 178 cámaras por cambio de dirección y 84 cámaras de paso adicionales. Los 27 empalmes se alojan en cámaras ya contabilizadas.

9. La pendiente de diseño es 3 %, superior al mínimo ENERCA de 0,1 % hacia las cámaras. La cubierta mínima general en PVC/HDPE es 0,45 m y en áreas con tráfico vehicular es 0,60 m [3].

10. La ampacidad base de ENERCA para cobre 2 AWG a 90 °C es 155 A. La ampacidad corregida del proyecto es 143,502 A y la máxima corriente de fase del flujo de carga es 8,219 A.

11. La caída máxima acumulada es 0,171 %, inferior al límite de regulación de 3 % para 13,2 kV. Las pérdidas de potencia se verifican contra 2,5 %; el límite de energía de 1,5 % requiere balance energético [3, 10].

12. La verificación de distorsión armónica de corriente de la Tabla 11 depende de I_{sc}/I_L y se desarrolla cuando se disponga del estudio de cortocircuito correspondiente.

12. Conclusiones

1. La actualización normativa modifica principalmente la canalización y la distribución de cámaras: ducto PVC DB de 6 in, pendiente mínima de 0,1 %, separación máxima de 80 m y cubierta de 0,45 m en condición general o 0,60 m en zonas con tráfico vehicular.

2. El conductor de cobre 2 AWG no se modifica. Además de satisfacer el calibre mínimo de ENERCA, presenta una ampacidad base de 155 A a 90 °C.

3. Con el ducto de 6 in, el llenado de la terna es 6,015 %, la relación de atoramiento es 7,062095 y el factor de peso de cálculo es 1,036282.

4. La mayor utilización de halado se presenta en T03 con 30,495 %. La presión lateral máxima también se presenta en T03 con 94,584 kgf/m, inferior al límite de 745 kgf/m.

5. La distribución final comprende 269 cámaras físicas: 7 nodos, 178 cámaras por cambio de dirección y 84 cámaras de paso. La máxima separación real es 79,861 m, inferior al límite de 80 m.

6. Las cantidades resultantes permanecen en 45,231 km de cable monopolar, 29,861 km de ductos y 27 puntos de empalme trifásico.

7. La caída máxima acumulada de 0,171 % permanece por debajo del 3 % permitido por ENERCA para 13,2 kV; las pérdidas de potencia también quedan por debajo del límite de 2,5 % en las verificaciones del libro de cálculo.

8. Con los parámetros y criterios actualizados, las seis rutas cumplen las verificaciones mecánicas de ocupación, halado, presión lateral, radio de curvatura y separación entre cámaras.

Referencias bibliográficas

[1] Ministerio de Minas y Energía. *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE*. Resolución 40284 del 23 de junio de 2026, Libros 1 a 4. https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-tecnico-de-instalaciones-electricas-retie/.

[2] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC. *NTC 2050, Código Eléctrico Colombiano, segunda actualización*.

[3] Empresa de Energía de Casanare S.A. E.S.P. - ENERCA. *Norma de Construcción de Redes de Media y Baja Tensión, Capítulo III. Redes Eléctricas en Media Tensión*. Código NR-MMD-PEG-01, versión 01. Numeral 1.7.2 y Tablas 3, 7, 9, 11, 12 y 13.

[4] Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. - ESSA. *NTR-02: Redes subterráneas de media tensión - aspectos eléctricos*. Numerales mecánicos 11.2 a 11.6.

[5] Empresas Públicas de Medellín - EPM. *RS1-021: Canalización de redes de energía*, 2020.

[6] Nexans Colombia / Centelsa by Nexans. *Cable Media Tensión Cobre 90 °C XLPE 15 kV, 100 % PC PVC, calibre 2 AWG*. Referencia Nexans 201726. https://www.nexans.co/es/products/Redes-de-Transmisi%C3%B3n-y-Distribuci%C3%B3n-de-Energ%C3%ADa/Cables-de-Media-Tensi%C3%B3n/Cables-de-Cobre-Media-Tensi%C3%B3n/MV90CuXLPE-PVC-15kV100/product~201726~.html.

[7] IEEE Standards Association. *IEEE Std 386-2025: IEEE Standard for Shielded Separable Insulated Connectors for Classes 15 kV through 35 kV*, 2026. https://standards.ieee.org/ieee/386/7573/.

[8] Eaton. *Cooper Power Series K-Limiter High Ampere Companion II Fuse; Overhead Line Installation and Protective Equipment Specifier's Guide*. Tablas de características, aplicación por tensión y coordinación fusible-fusible. https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/line-installation-and-protective-equipment/line-installation-and-protective-equipment-overhead-specifiers-guide-br100008en.pdf.

[9] Karney, Charles F. F. “Algorithms for geodesics.” *Journal of Geodesy*, 87, 43–55, 2013.

[10] Proyecto PGMN. *Libro consolidado de cálculos mecánicos y eléctricos de la red subterránea de media tensión*. Versión de trabajo 2026.

[11] Proyecto PGMN. *Archivos KMZ georreferenciados de las rutas T01–T06*. Trazado empleado para longitudes, abscisas, azimutes y ángulos, 2026.

[12] Euler, Leonhard. *Remarques sur l’effet du frottement dans l’équilibre*. Mémoires de l’Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Berlin, 1769.

[13] Eytelwein, Johann Albert. *Handbuch der Statik fester Körper: mit vorzüglicher Rücksicht auf ihre Anwendung in der Architektur*. Berlin: Realschulbuchhandlung, 1808.