



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de una subestación eléctrica de media a baja
tensión para un data center**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

Rafael Fernando Mena Espinoza

Asesor:
Dr. Ing. Edilberto Horacio Vásquez Díaz

Piura, julio de 2024



Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Rafael Fernando Mena Espinoza, egresado del Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 76376867.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"Diseño de una subestación eléctrica de media a baja tensión para un data center."
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniero mecánico eléctrico.
2. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - **Dr. Ing. Edilberto Horacio, Vásquez Díaz**, identificado con DNI N° 02805801
3. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
4. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
5. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
6. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 05/07/2024.

Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.

Resumen

En esta tesis se realizan los cálculos, la selección de componentes y el diseño de una subestación eléctrica de media a baja tensión para un centro de datos en el distrito de El Agustino, en Lima. La relevancia de este estudio radica en el empleo de nuevas tecnologías, como las celdas modulares de media tensión, y en la aplicación de los conocimientos adquiridos en las asignaturas de la rama eléctrica cursadas durante la carrera universitaria.

En el primer capítulo se desarrolla el marco teórico, donde se detallan todas las partes de una subestación eléctrica de media y baja tensión, así como las fórmulas que se utilizarán en el trabajo.

En el capítulo 2 se llevan a cabo los cálculos necesarios y se procede a la selección de componentes, incluyendo el transformador, las celdas de media tensión, los conductores y los componentes de protección.

Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio.



Tabla de contenido

Introducción	7
Capítulo 1 Subestación eléctrica	8
1.1 Subestación eléctrica de distribución	8
1.1.1 Clasificación	8
1.2 Red de distribución primaria	10
1.2.1 Red subterránea	10
1.2.2 Red aérea	18
1.3 Red secundaria	23
1.3.1 Selección de cable de baja tensión (BT)	23
1.3.2 Red aérea	24
1.3.3 Red subterránea	26
1.4 Transformador de potencia	26
1.4.1 Transformador en aceite	27
1.4.2 Transformado seco	27
1.5 Celda de media tensión	28
1.5.1 Características constructivas	28
1.5.2 Partes de celdas de media tensión	29
1.5.3 Celdas MT Prefabricadas o modulares	29
Capítulo 2 Desarrollo de la propuesta	32
2.1 Dimensionamiento del transformado de potencia	32
2.1.1 Potencia requerida (Pr)	32
2.1.2 Condiciones de ambiental	32
2.1.3 Características del sistema eléctrico	32
2.1.4 Selección de transformación de potencia	33
2.1.5 Selección de descargador de sobretensión (pararrayo)	34
2.1.6 Gabinete de protección	38
2.1.7 Control digital	39
2.2 Dimensionamiento de conductores	40
2.2.1 Dimensionamiento de conductores de media tensión	40
2.2.2 Dimensionamiento de cable de baja tensión	43
2.3 Dimensionamiento y selección de celdas modulares	45
2.3.1 Celda de remonte	46
2.3.2 Celda de protección con interruptor de potencia	46
2.4 Dimensionamiento del sistema de protección	47
2.4.1 Dimensionamiento de interruptor de potencia de MT	47
Conclusiones	50
Referencias	51
Apéndices	52
Apéndice A. Plano de celdas de media tensión	52
Anexos	53
Anexo A. Poste de concreto para redes aéreas de baja tensión	53
Anexo B Cimentación de estructuras de baja tensión	54

Lista de tablas

Tabla 1	Porcentaje de llenado según número de conductores	14
Tabla 2	Dimensiones de canalización MT	16
Tabla 3	Tabla de distancias mínimas de seguridad	21
Tabla 4	Tabla de postes de baja tensión	25
Tabla 5	Condiciones ambientales del lugar de trabajo	32
Tabla 6	Tabla de características del sistema eléctrico	32
Tabla 7	Características del transformador	33
Tabla 8	Tabla de dimensiones del transformador	34
Tabla 9	Parámetros mínimoa de trabajo del pararrayo	37
Tabla 10	Valores obtenidos del modelo ZU HV-120424	37
Tabla 11	Amperaje según calibre del cable N2XSY	41
Tabla 12	Amperaje corregido por factor de corrección	42
Tabla 13	Se presenta los amperajes de los cables N2XOH de la marca INDECO	44
Tabla 14	Tabla de capacidad amperimétrica para una terna y 2 ternas	45
Tabla 15	Datos para la selección de las celdas modulares	46
Tabla 16	Parámetros para la selección de interruptor de potencia MT	47



Lista de figuras

Figura 1	Subestaciones aéreas monoposte y biposte.....	9
Figura 2	Subestación compacta tipo bóveda	9
Figura 3	Subestación tipo interior.....	10
Figura 4	Conexión de tierra en terminal separable	12
Figura 5	Conexión en terminal exterior e interior	12
Figura 6	Pararrayo en la transición entre conductor subterráneo y aéreo	13
Figura 7	Canalización de circuitos bajo acera	14
Figura 8	Canalización con protección mecánica para circuitos MT	15
Figura 9	Cruzada bajo autopista	16
Figura 10	Terminaciones interior (a) y exterior (b).....	17
Figura 11	Conectores separables T simétrico (a) y asimétrico (b).....	17
Figura 12	Conector terminal tipo Recto (a) y codo (b)	18
Figura 13	Cable subterráneo MT.....	18
Figura 14	Disposición triangular.....	19
Figura 15	Disposición vertical, doble terna.....	20
Figura 16	Disposición Vertical, Horizontal	20
Figura 17	Cimentación de poste	22
Figura 18	Poste de concreto para redes aéreas.....	24
Figura 19	Detalle de cimentación de postes de baja tensión	25
Figura 20	Detalle de canalización de cables de BT y MT	26
Figura 21	Transformador de aceite.....	27
Figura 22	Transformador seco	28
Figura 23	Celda de remonte.....	30
Figura 24	Celda de protección con interruptor	30
Figura 25	Celda de protección con seccionador de potencia y fusible.....	31
Figura 26	Dimensiones de transformador seco.....	34
Figura 27	Funcionamiento del descargador de sobretensión	35
Figura 28	Curva de tensión de sobretensión temporal respecto de la tensión nominal	36
Figura 29	Pararrayo Fuente: tomado de “catalogo ZOTUPHV (ZOTUP)”	38
Figura 30	Gabinete de protección.....	39
Figura 31	Dispositivo electrónico de control térmico de motores y transformadores	40
Figura 32	Cable N2XSY	40
Figura 33	Tabla de terminales MT de la marca 3M	42
Figura 34	Terminal MT	43
Figura 35	Terminal MT exterior e interior	43
Figura 36	Cable N2XOH, de la marca indeco	44
Figura 37	Celda de remonte SM6	46
Figura 38	Celda interruptor SM6	47
Figura 39	Interruptor de potencia MT SF1.....	48
Figura 40	Parámetros de trabajo del interruptor SF1.....	49

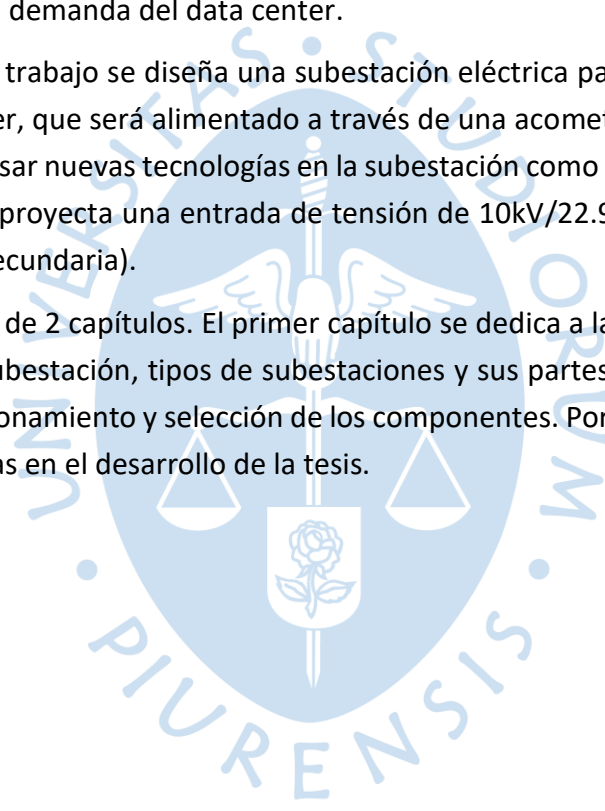
Introducción

El proyecto desarrollado se denomina “Diseño de una subestación eléctrica de media a baja tensión para un data center”. Este consiste la implementación de una subestación MT/BT de 10/22.9kV a 380V para satisfacer una demanda de 450kW en el distrito de El Agustino, Lima.

Una destacada empresa del mercado peruano ha emprendido la construcción de un Data Center para poder garantizar la seguridad y eficiencia de datos. Esta nueva implementación implica una demanda de energía significativa, estimada de 450kW. Actualmente la empresa cuenta con suministro de media tensión que llega a una subestación MT/BT existente de 1250kVA cuya carga ya está destinada para satisfacer la demanda de la empresa y no cubre la demanda del data center.

En el presente trabajo se diseña una subestación eléctrica para cubrir la demanda de energía del data center, que será alimentado a través de una acometida de media tensión. El proyecto contempla usar nuevas tecnologías en la subestación como son las celdas modulares de media tensión. Se proyecta una entrada de tensión de 10kV/22.9kV (Red primaria) y una salida de 380V (Red secundaria).

La tesis consta de 2 capítulos. El primer capítulo se dedica a la parte teórica, donde se definen que es una subestación, tipos de subestaciones y sus partes. En el segundo capítulo se procede al dimensionamiento y selección de los componentes. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la tesis.



Capítulo 1

Subestación eléctrica

Una subestación eléctrica es una instalación esencial dentro del sistema de distribución y transmisión de energía eléctrica. Son instalaciones diseñadas para modificar la tensión, la frecuencia, el número de fases o para conectar múltiples circuitos. Se encuentran ubicadas cerca de las plantas generadoras, en los alrededores de las zonas de consumo, o tanto dentro como fuera de los edificios. Contamos con 2 tipos de subestaciones que son las subestaciones de transformación y las subestaciones de maniobra.

Las subestaciones de transformación, su principal función es la elevación o disminución de la tensión según se requiera. Estos modifican la tensión eléctrica usando uno o más transformadores de potencia.

Las subestaciones de maniobra no cuentan con transformador de potencia. Estos se encargan de enlazar dos o más circuitos y realizan sus maniobras.

1.1 Subestación eléctrica de distribución

Una subestación eléctrica es un conjunto de instalaciones diseñadas para transformar la tensión eléctrica, realizar mediciones, seccionar y proteger circuitos. En esencia, una subestación incluye varios circuitos de entrada de la red primaria y salida hacia un sistema de distribución secundaria, todos conectados a un punto común conocido como el sistema de barras de la subestación. Los componentes principales de un circuito son el interruptor y el transformador de potencia, complementados por transformadores de medida, seccionadores, pararrayos y sistemas secundarios como control, protección, comunicaciones y servicios auxiliares.

Este sistema también incluye el sistema de puesta a tierra y las estructuras necesarias para albergar todas las instalaciones

1.1.1 Clasificación

De acuerdo con la Dirección General de Electricidad (DGE), las subestaciones se pueden clasificar según su función, su ubicación dentro del sistema eléctrico y su método de instalación.

Según su ubicación y forma de instalación:

Subestación aérea

Las subestaciones biposte tienen el transformador y los elementos de protección de la red primaria montados en una plataforma sostenida por dos postes.

Las subestaciones monoposte utilizan un solo poste y la plataforma como soporte. Todo el equipo en ambas subestaciones debe ser apto para uso exterior.

En la Figura 1 podemos ver un ejemplo de ambos tipos de subestación eléctrica.

Figura 1

Subestaciones aéreas monoposte y biposte



Subestación compacta

Las subestaciones compactas tienen una cuba metálica hermética que contiene el transformador junto con los equipos de maniobra y protección. Estas subestaciones pueden ser de tipo bóveda o tipo pedestal, dependiendo del lugar de instalación, que puede ser subterráneo o a nivel del suelo, con acceso restringido para personal no autorizado. En la Figura 2 tenemos un ejemplo de una subestación tipo bóveda perteneciente a la concesionaria Enel.

Figura 2

Subestación compacta tipo bóveda



Subestación convencional

En estas subestaciones, tanto el equipo como el transformador son de tipo interior y se ubican dentro de una construcción civil o una estructura metálica. En la Figura 3 podemos ver una subestación tipo interior perteneciente a una empresa pública del estado peruano.

Figura 3

Subestación tipo interior



1.2 Red de distribución primaria

Esta fase de la distribución eléctrica implica que la energía llegue a las subestaciones, donde se transforma y se distribuye en media tensión hacia la siguiente etapa de la red o directamente a consumidores industriales. Comprende los conductores, elementos de instalación y accesorios que operan a tensiones normalizadas de Distribución Primaria. Su objetivo es alimentar e interconectar una o más subestaciones de distribución, abarcando desde los terminales de salida del sistema alimentador hasta los terminales de entrada de la subestación alimentada.

1.2.1 Red subterránea

1.2.1.1 Selección del cable subterráneo

El cable seleccionado debe corroborarse que cumpla con los siguientes:

- Capacidad de corriente corregida
- Caída de tensión < 5%.

Capacidad de corriente corregida:

La capacidad de corriente de los cables especificados en las tablas de características de los fabricantes se ha determinado bajo determinadas condiciones de instalación.

Pero los cables son instalados a diferentes condiciones, por lo que los valores de las tablas deberán ser afectadas por factores de corrección. Las tablas de los factores las podemos encontrar en CNE.

$$I_{co} = I * FC \quad (1)$$

$$FC = FC_t + FC_{rtt} + FC_{pc} + FC_{pt} \quad (2)$$

Donde:

I_{co} =Capacidad de corriente corregida

FC_t = por temperatura del terreno

FC_{rtt} =por resistividad térmica del terreno

FC_{pc} = por proximidad a otros cables

FC_{pt} = por profundidad del tendido

Caída de tensión:

Los valores calculados para caída de tensión deberán cumplir con los valores máximos permitidos por la normativa aplicable.

De acuerdo al Código Nacional de Electricidad – suministro 2011, la variación de tensión permitida en todos los niveles de tensión es del $\pm 5\%$ de las tensiones nominales. Y en zonas rurales es del $\pm 6\%$.

$$\Delta V(\%) = \frac{\sqrt{3} \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \cdot L \cdot I}{V} * 100 \quad (3)$$

L: longitud de línea (m)

I: capacidad actual (A)

R: Resistencia del cable (Ω / km)

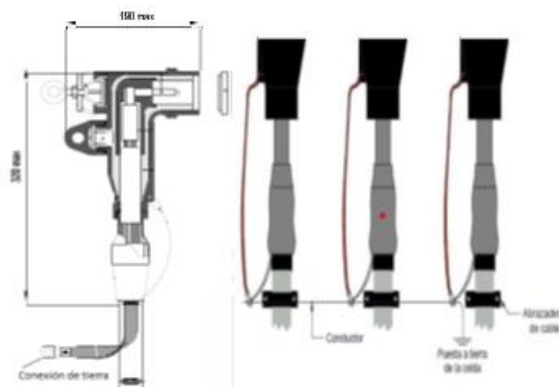
X: Reactancia del cable (Ω / km)

$\cos \varphi$: Factor de potencia de carga

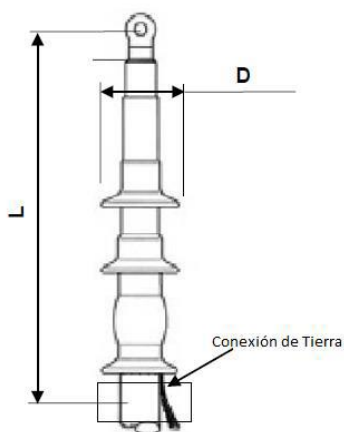
V: Nivel de tensión del sistema

1.2.1.2 Conexión de tierra

Generalmente, la pantalla del cable subterráneo de media tensión (MT) se conectará a tierra en los terminales correspondientes. El detalle de la conexión de la puesta a tierra de los terminales lo tenemos en la norma LI-7-605. En la Figura 4 y 5 podemos ver el aterramiento con distintos tipos de terminales.

Figura 4*Conexión de tierra en terminal separable*

Nota: Tomado de “*Instructivo Operativo n°2003*” (Enel, 2021).

Figura 5*Conexión en terminal exterior e interior*

Nota: Tomado de “*Instructivo Operativo n°2003*” (Enel, 2021).

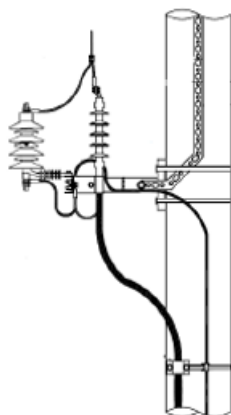
1.2.1.3 Descargador de sobretensión (pararrayo)

En los puntos donde los cables subterráneos se conectan con los conductores aéreos de Media Tensión, se colocará un pararrayos en los terminales del cable, conectando la pantalla metálica del cable a tierra, así como en la Figura 6. El diseño de pararrayos debe cumplir con la norma global GSCC016.

Asimismo, las terminaciones de los cables deben asegurarse con un soporte de fibra de vidrio para evitar daños por esfuerzos mecánicos inadecuados y deben estar conectadas a tierra.

Figura 6

Pararrayo en la transición entre conductor subterráneo y aéreo.



Nota: Tomado de “Instructivo Operativo n°2003” (Enel, 2021).

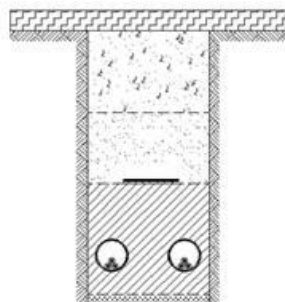
1.2.1.4 Criterios de construcción

La canalización debe proteger la integridad de los cables de media tensión contra esfuerzos mecánicos, ocasionado por el tráfico, o trabajo de terceros. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de canalización con protección mecánica.

Dentro de la zanja se colocarán elementos como el cable de media tensión, la protección mecánica, la señalización y el relleno. El trazado debe ser lo más recto posible y se instalará bajo la vereda o acera.

El criterio para el canalizado:

- Los cables se deben instalar dentro de Tubería de Polietileno de alta Densidad (HDPE).
- El número de ductos corresponderá al número de circuitos proyectado.
- Por ductos se instalar los 3 cables unipolares del mismo circuito.
- Irán enterrado a 1 metro de profundidad.
- La distancia de enterrado puede reducirse si existe algún impedimento y se debe añadir protección mecánica.
- La tracción del cable no puede ser mayor a 3kg/mm².

Figura 7*Canalización de circuitos bajo acera*

Nota: Tomado de “Instructivo Operativo n°2003” (Enel, 2021).

En casos particulares los cables MT podrán ir directamente enterrados, esto sucede cuando la trayectoria es compleja y sinuosa.

Dimensionamiento de ductos de media tensión

Para definir el ducto se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- a. **Espacio libre al interior (C):** es la relación entre la superficie exterior del cable y la superficie interior del tuvo. Donde:

D: Diámetro nominal interior del tuvo (pulgadas)

d: Diámetro nominal exterior del cable (pulgadas). Considerar $d=1.05*d$.

requerimiento $C \geq 0.5$ Pulgadas

$$C = \frac{D}{d} - 1,366d + 0,5(D - d) * \sqrt{\left[1 - \left(\frac{d}{D - d}\right)^2\right]} \quad (4)$$

- b. **Factor de llenado:** es la relación entre el área de los cables y interior del ducto. Se debe cumplir que el porcentaje de llenado sea $\leq 40\%$ (National electrical Code/ NFPA 70). Como podemos ver la Tabla 1, porcentaje de llenado para un cable es de 53%.

Tabla 1

Porcentaje de llenado según número de conductores

Número de cables	1	Más de 2
Porcentaje de llenado	53%	$\leq 40\%$

Nota: Adaptado de “Instructivo Operativo n°2003” (Enel, 2021).

c. Factos de atascamiento

- Si $1.05\frac{D}{d} > 3$ la posibilidad de atascamiento es baja o nula.
- Si $1.05\frac{D}{d} \leq 3$ posiblemente exista atascamiento.

D: Diámetro nominal interior del tubo (pulgadas)

d: Diámetro nominal exterior del cable (pulgadas).

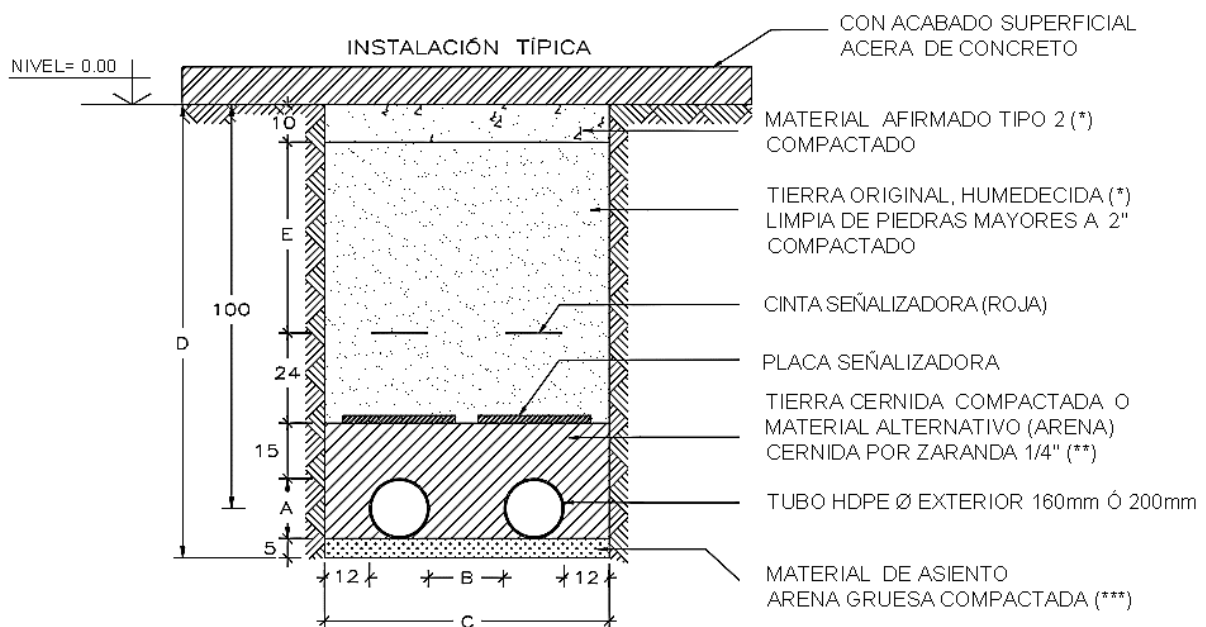
Zanja

La profundidad mínima para instalar los cables de media tensión será de 1.0 metro desde el nivel 0.0 hasta el eje del tubo. El relleno de la zanja consistirá en arena cernida, arena gruesa, tierra original humedecida, material afirmado tipo 2 y, dependiendo de la ubicación de la zanja, se restaurará la calzada o el asfalto. Ver Figura 8.

Para señalar la presencia de cables de media tensión, se coloca una cinta plástica de color rojo a lo largo de toda la canalización. Esta cinta debe mostrar claramente los símbolos y las leyendas que indiquen el posible peligro asociado con la presencia de los cables de alimentación. En la Tabla 2, se muestra los tipos de tuberías estandarizado para el canalizado de la concesionaria Enel.

Figura 8

Canalización con protección mecánica para circuitos MT



Nota: Tomado de "Instructivo Operativo n°2003" (Enel, 2021).

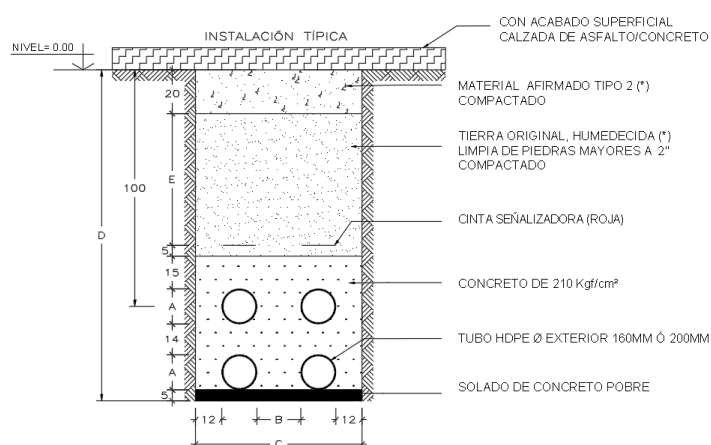
Tabla 2*Dimensiones de canalización MT*

	A(cm)	B(cm)	C(cm)	D(cm)	E(cm)
Tubo HDPE Ø exterior 160mm	16	14	70	113	43
Tubo HDPE Ø exterior 200mm	20	14	78	115	41

Nota: Adaptado de “Instructivo Operativo n°2003” (Enel, 2021).

Cruzadas

Las cruzadas se utilizarán en áreas donde se requiera una mayor protección mecánica. En estas zonas, los tubos estarán recubiertos de concreto de 210 kgf/cm². La cantidad de conductos en las cruzadas corresponderá al número de circuitos, de modo que cada terna se ubicará en un ducto de HDPE. Por lo general se dejan conductos de respaldo para evitar futuras intervenciones en las vías. En la Figura 9, podemos ver el detalle típico de la cruzada.

Figura 9*Cruzada bajo autopista*

Nota: Tomado de “Instructivo Operativo n°2003” (Enel, 2021).

1.2.1.5 Materiales

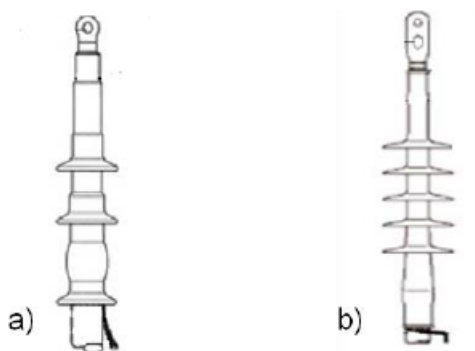
- Terminales pre-armados para cables MT:

Se utilizarán terminales aptos para instalación en interiores y en exteriores. La tecnología empleada será de tipo compacto de contracción en frío, conforme a la especificación global vigente. Estos terminales estarán compuestos por un conector terminal de perno fusible, un componente para el control del campo eléctrico, una carcasa aislante

principal, una conexión a tierra para la pantalla metálica, así como grasa y compuestos de sellado. En la Figura 10 podemos ver terminales pre-armados para uso interior y exterior.

Figura 10

Terminaciones Interior (a) y Exterior (b)



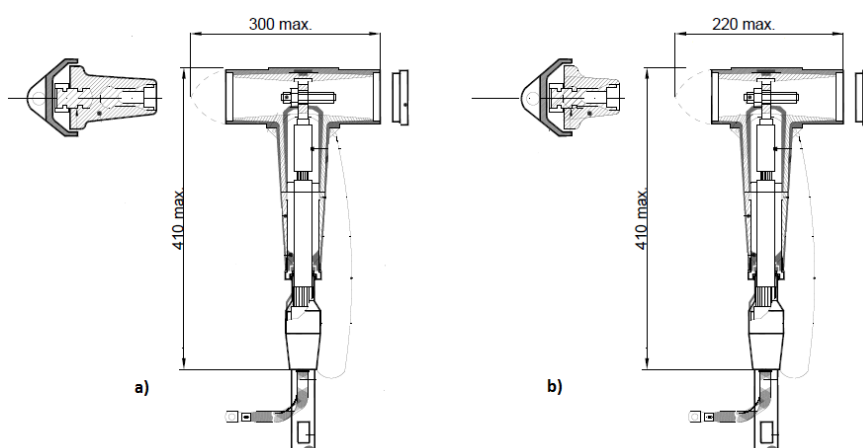
Nota: Tomado de "Instructivo Operativo n°2003" (Enel, 2021).

- Conector separable para cables MT

Se emplearán conectores adecuados como terminales para transformadores y seccionadores. Estos conectores están compuestos por una lengüeta de perno de corte, un componente para el control del campo eléctrico, una carcasa aislante principal, una conexión a tierra para la pantalla metálica, así como grasa y compuestos de sellado. En la Figura 11 y 12 podemos ver conectores separables de media tensión.

Figura 11

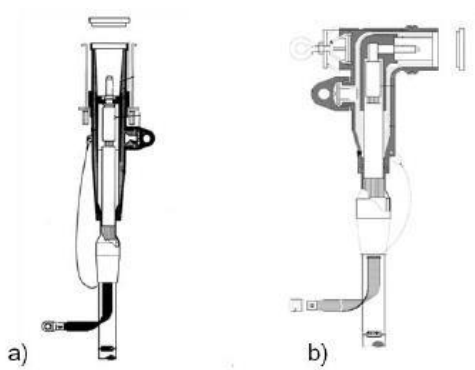
Conector separables T simétrico (a) y asimétrico (b)



Nota: Tomado de "Instructivo Operativo n°2003" (Enel, 2021).

Figura 12

Conector terminar tipo Recto (a) y Codo (b)



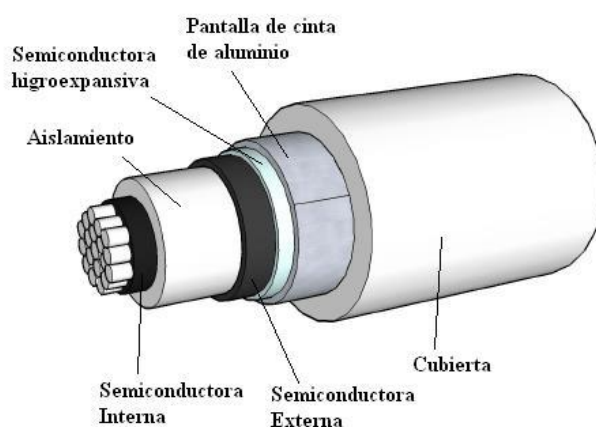
Nota: Tomado de “*Instructivo Operativo n°2003*” (Enel, 2021).

- Cables MT:

Los conductores pueden ser de cobre o aluminio, con una pantalla semiconductora del conductor, aislamiento XLPE, pantalla semiconductora sobre el aislamiento, pantalla metálica tipo tubo de aluminio adherida a la cubierta, y una cubierta exterior de polietileno, según se detalla en la norma global. En la Figura 12 podemos ver detalladas las partes de un cable de media tensión.

Figura 13

Cable subterráneo MT



Nota: Tomado de “*Instructivo Operativo n°2003*” (Enel, 2021).

1.2.2 Red área

Los conductores de MT a elegir para la red de distribución pueden ser de cobre, aluminio o aleación de aluminio. Es importante tener en cuenta las consideraciones mecánicas y eléctricas al hacer la selección.

1.2.2.1 Consideraciones eléctricas

Resistencia

La resistencia del material es directamente proporcional a la temperatura. La resistencia aumenta al incrementarse la temperatura. Al aumentar la temperatura, el número de choques con el núcleo del material también aumenta.

$$R_t = R_{20^\circ C} * [1 + 0.0036 * (T - 20)] \left(\frac{\text{ohm}}{\text{km}} \right) \quad (5)$$

$R_{20^\circ C}$ = Resistencia del conductor a los 20°C (ohm/km)

T = Temperatura de trabajo del conductor

Reactancia

La reactancia es un parámetro que depende de la disposición geométrica del conductor. En contraste con los cables MT subterráneos, la reactancia es considerablemente mayor.

$$XL = 0.386992 * \left[0.05 + 0.4605 \log \left(\frac{DMG}{r} \right) \right] \left(\frac{\text{ohm}}{\text{km} - \text{conductor}} \right) \quad (6)$$

R = radio del conductor (mm)

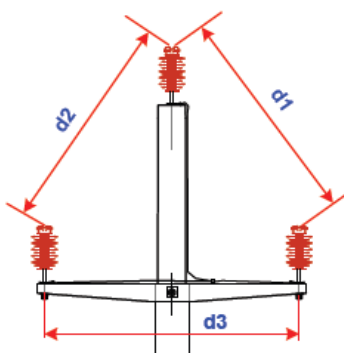
Dmg = distancia media geométrica entre los ejes de fases (mm)

Distancia media geométrica:

- $DMG = \sqrt[3]{d1 \times d2 \times d3}$

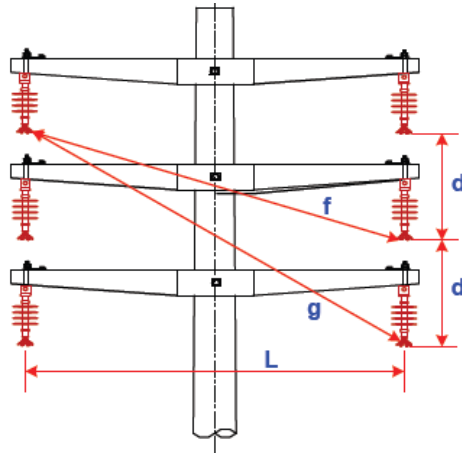
Figura 14

Disposición triangular



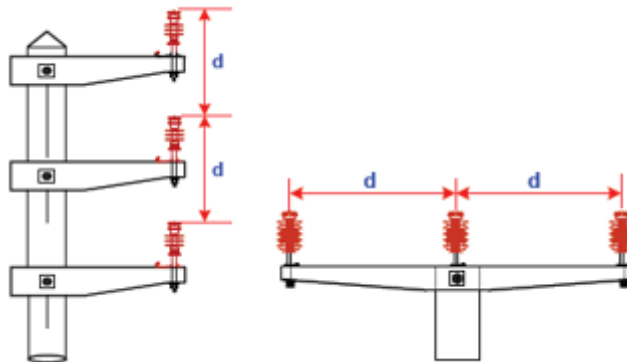
Nota: Tomado de "Modulo Diseño de subestaciones eléctricas" (Tecsup, 2023).

- $DMG = \sqrt[6]{2 \frac{4xf^4}{g^4}}$

Figura 15*Disposición vertical, doble terna*

Nota: Tomado de “Modulo Diseño de subestaciones eléctricas” (Tecsup, 2023).

- $DMG = \sqrt[3]{2} * d$

Figura 16*Disposición Vertical, Horizontal*

Nota: Tomado de “Modulo Diseño de subestaciones eléctricas” (Tecsup, 2023).

Calentamiento

Como consecuencia del efecto Joule, se genera calentamiento. Cuando la temperatura supera cierto nivel, comienza a deteriorarse el material, lo que provoca envejecimiento.

Distancia mínima de seguridad (DMS)

- DMS de conductor y superficie del terreno

En la Tabla 3 se presenta las distancias mínimas de seguridad según el lugar en que se encuentre el conductor.

Tabla 3

Table de distancias mínimas de seguridad

Lugar	Distancia
Cruce de calles y avenidas	7.0m
A lo largo de calles y caminos	6.0m
En lugares con circulación de maquinaria agrícola	6.0m
En lugares accesible solo a patones	5.0m
En laderas no accesible a personal o vehículos	3.0m

Nota: Tomado de “Modulo Diseño de subestaciones eléctricas” (Tecsop, 2023).

- DMS entre conductores del mismo circuito
 - Horizontal =0.7m
 - Vertical =1.00m

1.2.2.2 Consideraciones mecánicas

Postes

La principal característica de los postes será el asegurar las líneas MT. Los factores que se tendrán en cuenta al momento del dimensionamiento mecánico serán la tracción resultante de la línea MT y de otros servicios presente en el poste como puede ser las líneas de baja tensión, alumbrado público, redes de fibra óptica y cables de empresa de telecomunicaciones.

Para construcción de líneas aéreas tenemos la variedad de postes de concreto y postes de fibra de vidrio. Los postes de madera ya no se consideran para la construcción de líneas de media tensión. El uso de los postes de fibra de vidrio se seleccionará bajo el criterio del tipo de ambiente contaminante (salino) y poca accesibilidad a la zona de trabajo. Gracias al bajo peso del poste de fibra de vidrio, este no necesitara de ayuda de vehículos pesados en la instalación.

1.2.2.3 Cimentación

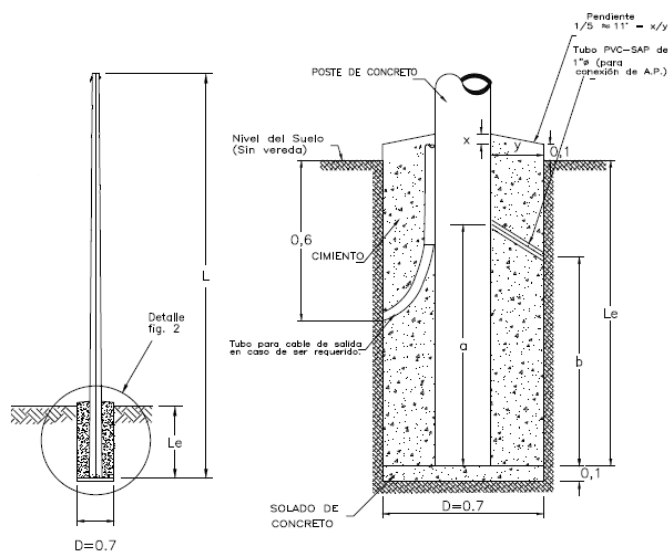
Todos los postes, ya sea de concreto o fibra de vidrio se instalarán con cimentación. Detalle de cimentación puede ser observado en la Figura 17, donde la profundidad del poste (L_e) sera definida por la siguiente formula.

$$L_e = [0.1 * L + 0.7] (m) \quad (7)$$

L: altura total de poste

Figura 17

Cimentación de poste



Nota: Tomado de "Instructivo Operativo n°2003" (Enel, 2021).

1.2.2.4 Ménsulas y crucetas

Las líneas de MT se construyen utilizando brazos de soporte (ménsulas) o brazos cruzados (crucetas).

Entre las principales funciones de las crucetas se encuentra la fijación de aisladores rígidos, el anclaje de aisladores de suspensión en postes sin salida, el anclaje de aisladores de suspensión en polos de ángulos, y la realización de derivaciones de circuito, entre otras.

Por otro lado, las ménsulas tienen como funciones principales la fijación de aisladores de suspensión, la fijación de aisladores rígidos y el anclaje de aisladores de suspensión en postes de vértices.

Tanto las crucetas como las ménsulas deben ser diseñadas de tal manera que puedan soportar tensiones longitudinales, transversales y axiales debido a la tracción del conductor en el punto de sujeción.

1.3 Red secundaria

Es la parte de la distribución eléctrica que opera en baja tensión, se encarga de distribuir la energía desde las subestaciones de distribución hasta los clientes finales como puede ser domicilios, negocios y pequeñas empresas. El correcto dimensionamiento de componentes de protección y la puesta a tierra son primordiales para evitar fallos y accidentes.

1.3.1 Selección de cable de baja tensión (BT)

Según el tipo de instalación, aérea o subterránea los cables pueden ser de cobre, aluminio o aleación, con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE).

Para redes aéreas se usa cables trenzados alrededor del cable portante. El cable portante cumple la función mecánica, soportando los cables conductores.

Para redes subterráneas se usan 2 o 3 cables unipolares, diferenciados por fase según la normativa de colores.

Caída de tensión:

La caída de tensión permitida será 5,0% en zonas urbanas y del 7,5% en zonas urbano-rural y rural.

Formula de caída de tensión trifásico:

$$\Delta V(\%) = \frac{\sqrt{3} \cdot L \cdot I \cdot \cos\phi}{K \cdot S} \quad (8)$$

Formula de caída de tensión monofásico:

$$\Delta V(\%) = \frac{2 \cdot L \cdot I \cdot \cos\phi}{K \cdot S} \quad (9)$$

Donde:

ΔV : caída de tensión (v)

L: Longitud del cable (m)

I: intensidad de corriente (A)

$\cos\phi$: Factor de potencia

S: sección del cable(mm²)

K: conductividad del cable (56 Cu, 35 Al)

Capacidad de corriente del conductor:

La tabla del fabricante contiene las especificaciones técnicas de los cables bajo determinadas condiciones. Los cables son instalados en distintas condiciones por lo que los

valores de tablas se verán afectadas por los factores de corrección que se representan en tablas. Estas se encuentran en el CNE.

1.3.2 Red aérea

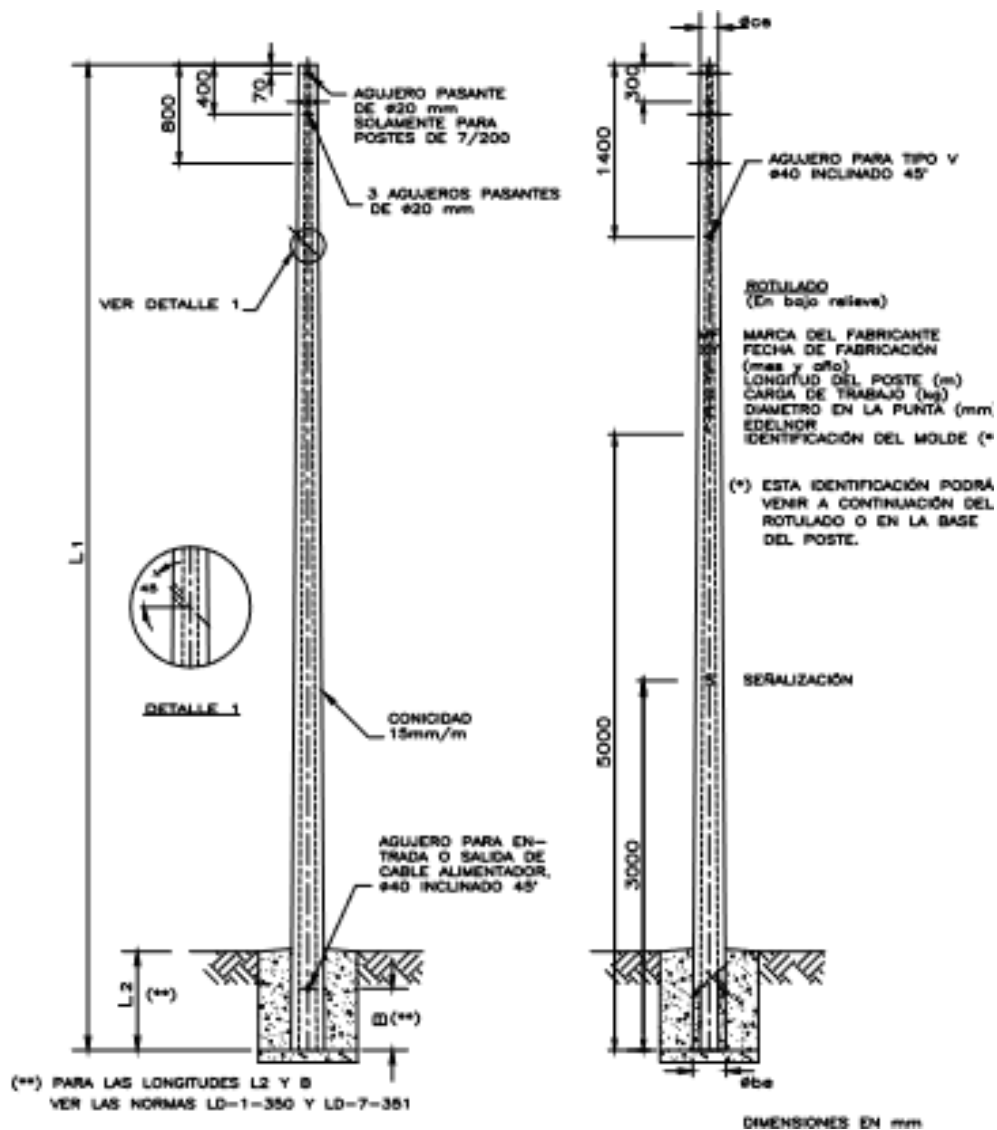
Postes

Las redes aéreas van soportadas sobre postes de concreto o de fibra de vidrio. Los postes tienen la función de soportar todos los esfuerzos de tracción y de las líneas de baja tensión, alumbrado público y telecomunicaciones.

En la Tabla 4, tenemos las características de los postes usados para la red aérea de baja tensión, acompañado de la Figura 18. En esta figura se visualiza los parámetros de la tabla.

Figura 18

Poste de concreto para redes aéreas



Nota: Tomado de "LE-1-010_3 POSTES DE CONCRETO PARA REDES AÉREAS DE BAJA TENSIÓN" (Enel, 2015).

Tabla 4

Tabla de postes de baja tensión

Descripción	L1(m)	Carga de trabaja (kg)	de Cima (mm)	\varnothing_{ce} (mm)	Base \varnothing_{be} (mm)	Factor de seguridad
7,0/200/2,0/150/255	7	200	150	255	2	
8,0/200/2,0/150/270	8	200	150	270	2	
9,0/200/2,0/150/285	9	200	150	285	2	
11,0/200/2,0/150/315	11	200	150	315	2	

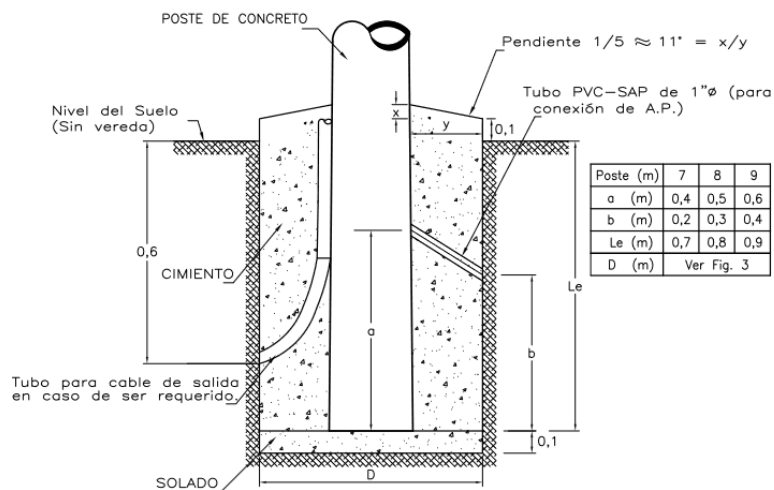
Nota: Tomado de "LE-1-010_3 POSTES DE CONCRETO PARA REDES AÉREAS DE BAJA TENSIÓN" (Enel, 2015).

Cimentación

Para los postes se usará un solado y cimiento de concreto. La longitud de empotramiento (L_e) es el 10% de la longitud total del poste (ver Figura 19).

Figura 19

Detalle de cimentación de postes de baja tensión



Nota: Tomado de "LD-1-350_0 Cimentación de estructuras de BT" (Enel, 2005).

1.3.3 Red subterránea

1.3.3.1 Canalización:

La canalización de los cables de baja tensión puede ir en la zanja directamente enterrado, en tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) o dentro de cruzada.

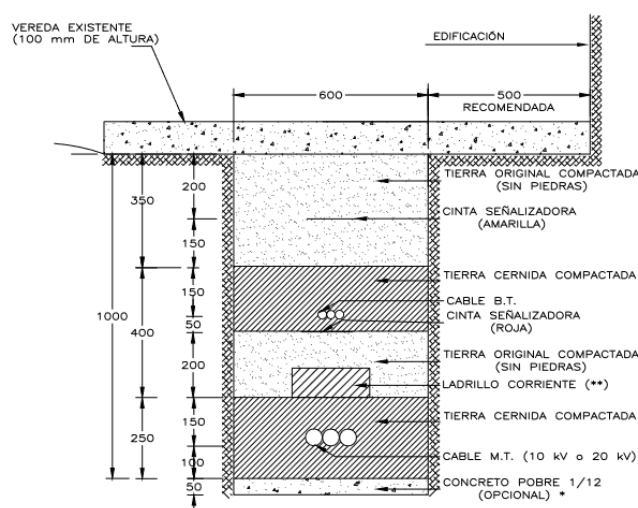
Zanja

La profundidad mínima para instalar los cables de baja tensión será de 0.6 metro desde el nivel 0.0 hasta el eje del tubo. El relleno de la zanja consistirá en arena cernida, tierra original humedecida, material afirmado tipo 2 y, dependiendo de la ubicación de la zanja, se restaurará la calzada o el asfalto. El trazado tendrá que ser lo más recto posible.

En la figura 20, se presenta el detalle de canalización directamente enterrado tanto de los cables de baja tensión como el de media tensión.

Figura 20

Detalle de canalización de cables de BT y MT



Nota: Tomado de "CI-3-021_2 Directamente enterrados bajo vereda sin construir" (Enel, 2017).

Cruzada

Usado por lo general en lugares donde se necesite mayor protección mecánica, como en el cruce de las vías de tránsito vehicular. Son estructuras de concreto de 210 kgf/cm² que contienen las tuberías HDPE.

1.4 Transformador de potencia

Los transformadores son dispositivos estáticos compuestos por dos bobinas de corriente alterna enrolladas alrededor de un núcleo magnético. La bobina conectada a la fuente de energía se denomina bobina primaria, mientras que la que proporciona energía a las cargas se conoce como bobina secundaria. La bobina primaria tiene un número de vueltas

N1 y la secundaria un número de vueltas N2, lo que define la relación de transformación. El núcleo magnético está constituido por láminas de acero al silicio apiladas y aisladas entre sí para minimizar las pérdidas magnéticas del transformador.

Según la ubicación o las necesidades del cliente, los transformadores pueden estar equipados con pararrayos, termómetro de aceite, indicador de nivel de aceite, manómetro, relé Buchholz, entre otros accesorios.

1.4.1 Transformador en aceite

El transformador en aceite (Figura 21), son usados para reducir o elevar el voltaje de la red eléctrica. Los transformadores están fabricados con láminas de acero de acero silicoso, con bobinado de cobre o aluminio, y refrigeración en aceite dieléctrico.

La refrigeración se hace por medio del tanque ondulado o por medio de radiadores, con esto se permite la transferencia de calor.

Los aceites usados son aceites dieléctricos minerales y dieléctrico vegetal (Envirotemp FR3) cuyos puntos de inflamación son mayores a 150°C y 300°C correlativamente.

Figura 21

Transformador en aceite



Nota: Tomado de "Catalogo de transformadores" (Promelsa, 2024).

1.4.2 Transformado seco

Los transformadores tipo seco (Figura 22), no necesitan aceite como refrigerante, por lo que no necesita pozo o sumideros. Cuenta con una alta resistencia térmica. Por lo general van dentro de un gabinete de protección con un determinado grado de protección.

Los transformadores secos están encapsulados dentro de resina termoendurecible y llenado al vacío con aditivos para darle dureza y flexibilidad.

Figura 22*Transformador seco*

Nota: Tomado de “*Catalogo de transformadores*” (Promelsa, 2024).

1.5 Celda de media tensión

Las celdas de media tensión pueden ser de uso interior o exterior, con grados de protección IP4X e IP54 respectivamente. Para las celdas de uso interior, estas estarán en una sala de celdas y se deberá tener acceso a cada sección para su mantenimiento.

Los cables de media tensión deben entrar y salir de la celda de MT por la parte posterior y para los cables de control su ingreso es por la parte superior o inferior, según la especificación del cliente.

1.5.1 Características constructivas

Las celdas deben ser a prueba de arco eléctrico interno, cumpliendo con los criterios de la norma IEC 62271-200 Anexo A. este deberá tener su certificado de arco interno vigente.

Su construcción será en planchas de acero galvanizado, pero también se podrá usar chapa de acero no galvanizado previamente tratada y pintada.

Todas las partes metálicas de la estructura deberán estar aterradas.

Corrosión galvánica, es crucial tener en cuenta la interacción entre diferentes metales para evitar una corrosión acelerada.

Las celdas de media tensión deben ser autosoportadas y diseñadas para ser montadas con pernos de anclaje en una base de concreto, además deberá contar con los accesorios para su montaje. Asimismo, deben poseer la rigidez necesaria para resistir los esfuerzos durante el transporte, la instalación y el funcionamiento, incluyendo aquellos causados por sismos y cortocircuitos.

Su aislamiento puede ser por a aislamiento de aire (AIS-Air Insulated Switchgear) o por aislamiento de gas (GIS-Gas Insulated Switchgear).

1.5.2 Partes de celdas de media tensión

Interruptores

Los interruptores serán trifásicos, de energía acumulada por resorte accionado por motor, con mecanismo de cierre y apertura operador eléctricamente.

Para las celdas aisladas en aire, contarán con interruptores tipo extraíble y para las celdas aisladas en gas, contarán con interruptores fijos.

Seccionadores

El seccionador se encarga de separar mecánicamente la fuente de energía de los circuitos eléctrico. Su principal función la desconexión segura, lo que permite realizar paradas de emergencia o tareas de mantenimiento.

Los seccionadores pueden ser de uso interior o exterior y pueden o no contar con fusible, esto le agrega un grado más de protección, ya que apertura la conexión en caso de sobrecarga o falla eléctricas.

Otros elementos y componentes

También se va a contar con otros componentes como calefactores, detectores de presencia de tensión, señalización, alarmas, placas de identificación, transductores, transformadores de corriente.

1.5.3 Celdas MT Prefabricadas o modulares

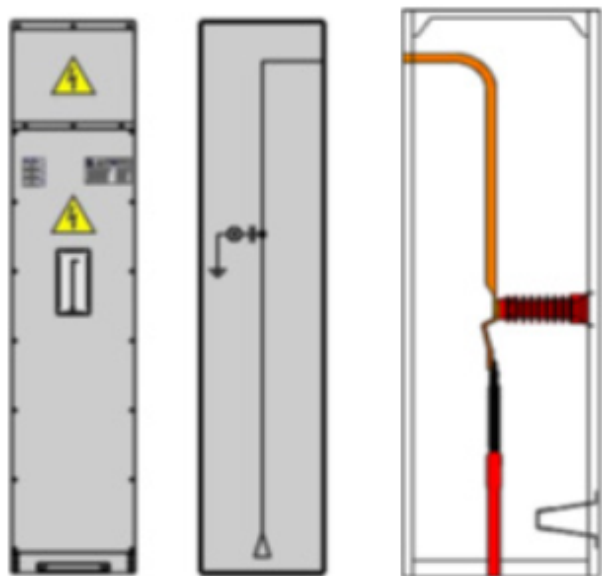
Son unidades bajo envolventes metálicas equipadas con aparatos de corte y seccionamiento que utilizan el hexafloruro de azufre (SF₆) como elemento aislante y de corte de los seccionadores bajo carga, interruptores automáticos (aislamiento en vacío o SF₆), seccionadores de aislamiento.

Estas celdas son suministradas y montadas en fábrica, las interconexiones entre equipos y cableados no son realizados en obra. El montaje en obra de la subestación consiste en la interconexión entre celdas mediante unas barras suministradas por el fabricante

Tipos de celdas modulares:

Celda de remonte

La celda de remonte (ver Figura 23) es donde llegan los cables energizados con voltaje en media tensión e interconexiona con otras celdas. Estos pueden contar con instrumentos de media de corriente y voltaje o led indicador de presencia o no de energía.

Figura 23*Celda de remonte*

Nota: Tomado de “Modulo Diseño de subestaciones eléctricas” (Tecsups, 2023).

Celda de protección con interruptor de potencia:

Su función principal es la protección de la llegada a la subestación o protección de equipos críticos. Contará con interruptor de potencia, seccionador con 3 posiciones con puesta a tierra, instrumento de medición e indicadores de presencia o no de energía (led). En la Figura 24 se muestra un ejemplo de celda de protección con interruptor de potencia.

Figura 24*Celda de protección con interruptor*

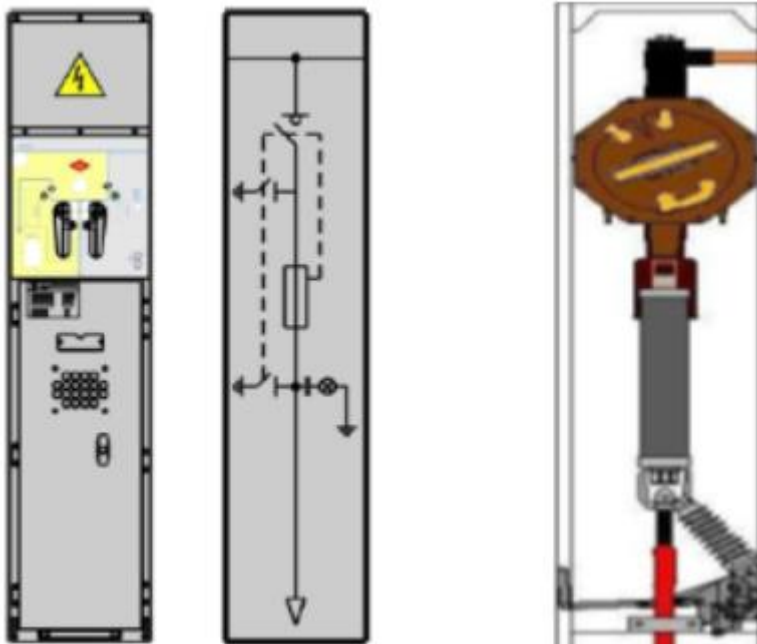
Nota: Tomado de “Modulo Diseño de subestaciones eléctricas” (Tecsups, 2023).

Celda de protección con seccionador de potencia y fusible:

Su función principal es la protección del transformador de potencia (menos a 1kVA). Está compuesta por un seccionador de potencia de 3 posiciones encapsulado en SF₆, enclavamiento de puesta a tierra, fusibles según amperaje y voltaje del tipo CEF e indicadores de presencia de voltaje y corriente. En la figura 25 se muestra un ejemplo de celda de protección con seccionador y fusible.

Figura 25

Celda de protección con seccionador de potencia y fusible



Nota: Tomado de "Modulo Diseño de subestaciones eléctricas" (Tecsups, 2023).

Capítulo 2

Desarrollo de la propuesta

En este capítulo se desarrollará el dimensionamiento y selección de componente de la subestación eléctrica MT/BT. El voltaje en media tensión es de 10kV, pero por los cambios de tensión a 22.9kV que viene haciendo la concesionaria eléctrica en algunos alimentadores, los componentes se seleccionarán para dicha tensión.

2.1 Dimensionamiento del transformado de potencia

El transformador de potencia se dimensionará y seleccionará según la potencia y las condiciones de trabajo. La potencia de trabajo será 450kW (500kVA). El transformador va a estar sobre dimensionado un 20% para futuras cargas. Como la subestación eléctrica es de tipo interior se elegirá un transformador seco.

2.1.1 Potencia requerida (P_r)

$$P_r = P * 1.2$$

$$P_r = 500kVA * 1.2 = 600kVA$$

2.1.2 Condiciones de ambiental

En la tabla 5, mostramos las condiciones ambientales en las que va a ser instalado el transformador de potencia.

Tabla 5

Condiciones ambientales del lugar de trabajo

Condición ambiental de instalación	
Altura sobre el nivel del mar	200 m.s.n.m.
Humedad relativa	82.8%
Temperatura ambiental promedio	19°C

2.1.3 Características del sistema eléctrico

En la tabla 6, mostramos las condiciones eléctricas en las que va a trabajar el transformador de potencia seleccionado

Tabla 6

Tabla de características del sistema eléctrico

Características del sistema eléctrico

Potencia requerida	600kVA
Tensión nominal primaria	10kV/22.9kV (futuro)
Tensión nominal secundaria	380v
Frecuencia	60Hz
Servicio	Continuo

2.1.4 Selección de transformación de potencia

Una vez definidas las condiciones de trabajo procedemos a la selección del transformador. Escogemos la potencia comercial más cercana y superior a la potencia requerida. También que cumpla con la relación de transformación y frecuencia que se necesita. En la tabla 7, se presenta los datos del transformado escogido.

Tabla 7

Características del transformador

Transformador seleccionado	
Potencia	630kVA
Tensión Primaria	10kV/20kV $\pm 2 \times 2.5\%$
Tensión secundaria	380
Conexión	Dyn5/Yyn6(futuro)
Frecuencia	60Hz
Serie	20842
Altitud	1000 m.s.n.m.
Montaje	interior

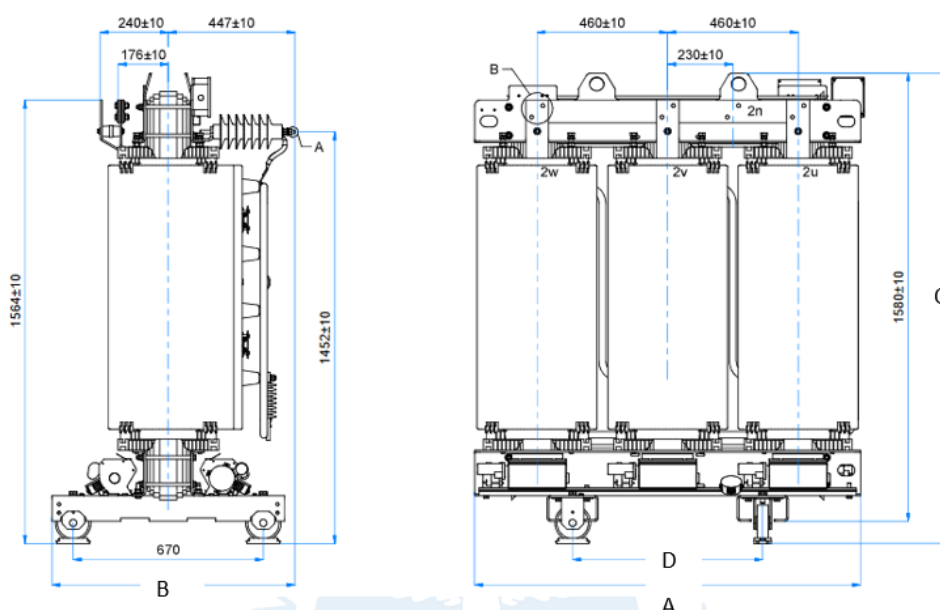
Nota: Se selecciona un transformador que cumpla con las condiciones eléctricas y ambientales.

Dimensiones:

En la tabla 8, se puede apreciar las dimensiones y peso del transformador de potencia.

Tabla 8*Tabla de dimensiones del transformador*

Potencia (kVA)	A	B	C	D	PESO (kg)
630	1360	857±10	1658±10	670	1690

Figura 26*Dimensiones de Transformador seco*

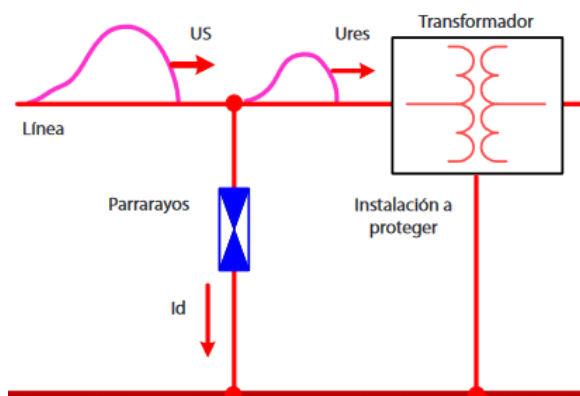
Nota: Tomado de “fabricante” (DELCROSA).

2.1.5 Selección de descargador de sobretensión (pararrayo)

Se instala un pararrayo en el transformador, en la entrada de la red de media tensión. Este dispositivo se instala con la intención de absorber las sobretensiones que se producen en el sistema, protegiendo así los equipos que se encuentra aguas arriba. En la figura 32 podemos ver cómo funciona el descargador de sobre tensión frente a una sobretensión.

Figura 27

Funcionamiento del descargador de sobretensión



Nota: Tomado de "Modulo Diseño de subestaciones eléctricas" (Tecsup, 2023).

Máxima tensión de operación continua (MCOV o U_c):

$$U_c \text{ o MCOV} \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

$$U_c \text{ o MCOV} \geq \frac{22.9kV * 1.05}{\sqrt{3}} = 13.9 kV$$

Donde:

U_m : Tensión máxima de servicio entre fases= $V_n * 1.05$

Sobretensión temporal (TOV):

$$TOV \geq K_e \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$TOV \geq \sqrt{3} \frac{22.9kV * 1.05}{\sqrt{3}} = 24.05kV$$

Donde:

K_e : Factor de conexión a tierra

K_e : 1,4 para sistemas con neutro aterrado

K_e : $\sqrt{3}$ para sistemas con neutro aislado

Tensión nominal de pararrayo (U_r):

Es el mayor valor eficaz permitido para la tensión a frecuencia industrial para el que el pararrayo ha sido dimensionado. La tensión U_r , es el mayor valor entre la U_{r1} y U_{r2} . El fabricante proporciona la curva para la selección del factor K_t , así como podemos ver en la figura 28.

$$U_{r1}: \frac{1}{K_o} * U_c \quad (12)$$

$$U_{r1}: \frac{1}{0.8} * 13.9kV = 17.38kV$$

$$U_{r2}: \frac{1}{K_t} * TOV \quad (13)$$

$$U_{r2}: \frac{1}{1.0} * 22.9kV = 22.9kV$$

Resultado:

$U_{r2} > U_{r1}$

$U_r = U_{r2} = 21.6kV$

Donde:

U_{r2} : Tensión nominal del pararrayo

U_{r1} : Tensión nominal del pararrayo

K_o : 0.8 proporcionado por la norma ANSI

K_t : Relación de la tensión de sobretensión temporal respecto de la tensión nominal U_r .

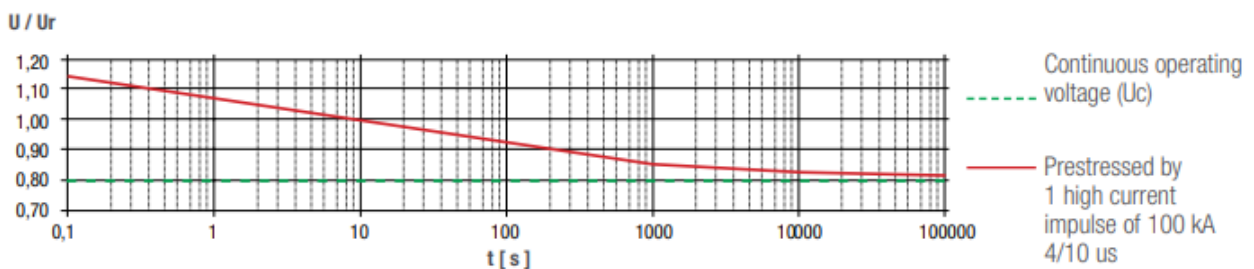
Seleccionar valor K_t de la curva de la figura 28.

Utilizar $t=1s$ (tiempo de duración de la sobretensión temporal), para sistemas con neutro puesto a tierra.

Utilizar $t=10s$ (tiempo de duración de la sobretensión temporal), para sistemas con neutro aislado.

Figura 28

Curva de tensión de sobretensión temporal respecto de la tensión nominal



Nota: Tomado de "Catalogo ZOTUPHV" (ZOTUP).

Corriente nominal de descarga:

Es la corriente que se descarga a tierra producto de sobretensiones, esta se expresa en kA. Los pararrayos se fabrican para corrientes de descarga de 5, 10 y 20kA. Normalmente las subestaciones MT/BT usan el de 5kA pero en zonas donde pueda caer un rayo se usa 10kA.

Como la subestación eléctrica proyectada, es una subestación de interior escogeremos un pararrayo de 5kA como mínimo. Plasmamos todos los datos obtenidos para la selección del pararrayo en la tabla 9.

Tabla 9

Parámetros mínimos de trabajo del pararrayo

Tensión de trabajo	Uc(kV)	TOV(kV)	Ur(kV)	In(KA)
22.9Kv	13.9	24.5	22.9	5kA

Procedemos a seleccionar un pararrayo que cumpla con los valores mínimos de diseño encontrados del fabricante ZOTUP.

Escogemos el modelo ZU HV-120424 (ver figura 29) que cuenta con las siguientes características:

Tabla 10

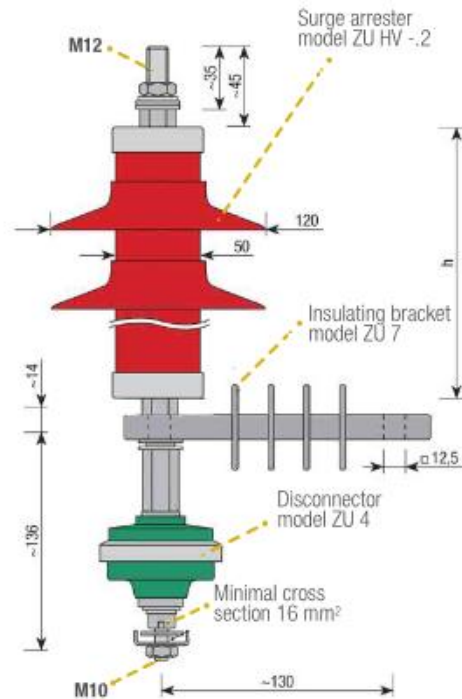
Valores obtenidos del modelo ZU HV-120424

	Uc(kV)	TOV(kV)	Ur(kV)	In(KA)
Valores	19.2	26.2	24	10kA

Nota: Tomado de "Catalogo ZOTUPHV" (ZOTUP).

Figura 29

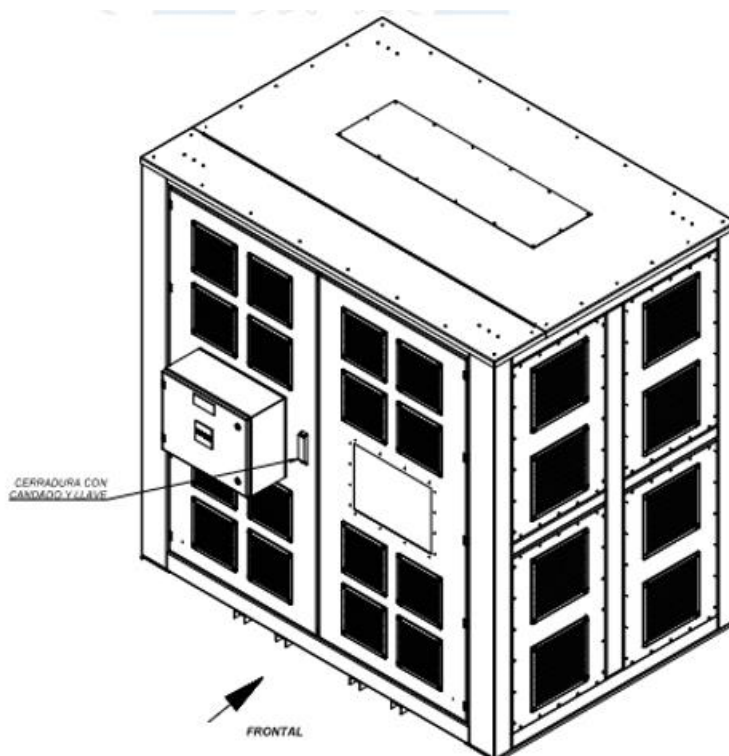
Pararrayo Fuente: Tomado de "Catalogo ZOTUPHV" (ZOTUP)



Nota: Tomado de "Catalogo ZOTUPHV" (ZOTUP).

2.1.6 Gabinete de protección

Esta envolvente metálica contendrá al transformado de potencia y las barras de tierra. Contará con un grado de protección IP41. Y su función principal es el evitar el libre acceso al transformador de potencia. En figura 30, podemos ver el diseño de gabinete obtenido del fabricante DELCROSA.

Figura 30*Gabinete de protección*

Nota: Tomado de "FABRICANTE" (DELCROSA).

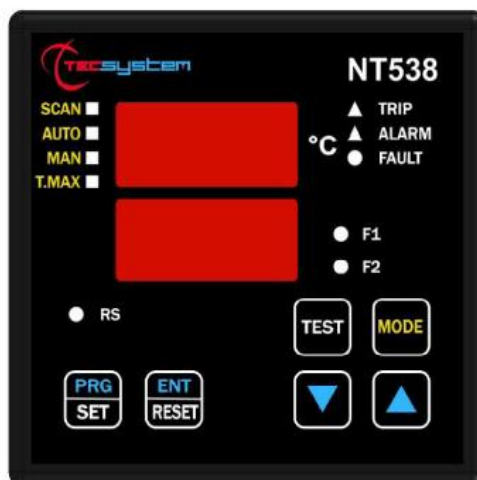
2.1.7 Control digital

El transformador contará con un controlador digital NT538, ubicado en una cajuela en la puerta de la envolvente metálica, que monitoreará la temperatura de los devanados con sensores PT100 y controlará el sistema de ventilación del área donde se ubica la subestación eléctrica.

Además, tendrá un sistema de alarma en caso sobrepase la máxima temperatura permitida y manda una señal de apertura a la celda interruptor. El NT538 (ver figura 31), tendrá una alimentación externa en baja tensión.

Figura 31

Dispositivo electrónico de control térmico de motores y transformadores



Nota: Tomado de "FABRICANTE" (PECSYSTEM).

2.2 Dimensionamiento de conductores

2.2.1 Dimensionamiento de conductores de media tensión

Se dimensionará el conductor que alimenta la celda de media tensión con el transformador de potencia el cual irá por bandeja. El cable de entrada a la subestación (acometida MT) está dentro del alcance de la concesionaria de distribución eléctrica (ENEL).

Trabajaremos con el cable N2XSY (ver Figura 32), este es un conductor de cobre electrolítico recocido, compactado, con aislamiento de XLPE, compuesto semiconductor extruido, alambres de cobre electrolítico sobre el conductor aislado y una cubierta externa de PVC.

Figura 32

Cable N2XSY



Nota: Tomado de "Catalogo de cables N2XSY" (Indeco).

Intensidad de corriente admisible (I_{ad}):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\phi} \quad (A) \quad (14)$$

$$I = \frac{630kVA}{\sqrt{3} * 10kV} = 36.42A$$

Selección de conductor

Capacidad de corriente de los conductores N2XSY 18/30kV, 90°C de 3 cables en contacto agrupado en triangulo. En la tabla 11, muestra 3 calibres de cables N2XSY con sus respectivas capacidades de corriente según información del fabricante.

Tabla 11

Amperaje según calibre de cable N2XSY

Calibre	Capacidad corregida (3 cables unipolares en agrupación triangular)
50mm ²	245 A
70mm ²	300 A
95mm ²	365 A

Nota: Adaptado de "Catalogo de cables N2XSY" (INDECO).

Capacidad de corriente corregida:

$$I_{co} = I * FC \quad (1)$$

$$FC = FC_t + FC_{rtt} + FC_{pc} + FC_{pt} = 1$$

Donde:

FC _t = por temperatura del terreno	No valido
FC _{rtt} =por resistividad térmica del terreno	No valido
FC _{pc} = por proximidad a otros cables	Valor de tabla del fabricante
FC _{pt} = por profundidad del tendido	No valido

En la tabla 12, se muestran los resultados de la corriente corregida. Como el resultado de los factores de corrección ha sido igual a uno, la capacidad de corriente de los conductores no ha variado.

Tabla 12*Amperaje corregido por factor de corrección*

Calibre	Capacidad corregida (3 cables unipolares en agrupación triangular)
50mm ²	245 A
70mm ²	300 A
95mm ²	365 A

Nota: Como el FC es igual a 1, la capacidad de los cables se mantiene igual.

Con estos resultado se escoge el conductor 3-1x50mm² N2XSY 18/30kV que tiene una capacidad de 245 A y la corriente nominal de la subestación es de 36.42 A.

Selección de terminal MT

Se selecciona un terminal de tipo interior para el cable previamente seleccionado (3-1x50mm² N2XSY 18/30kV, diámetro exterior 33.5mm).

Figura 33

Tabla de terminales MT de la marca 3M

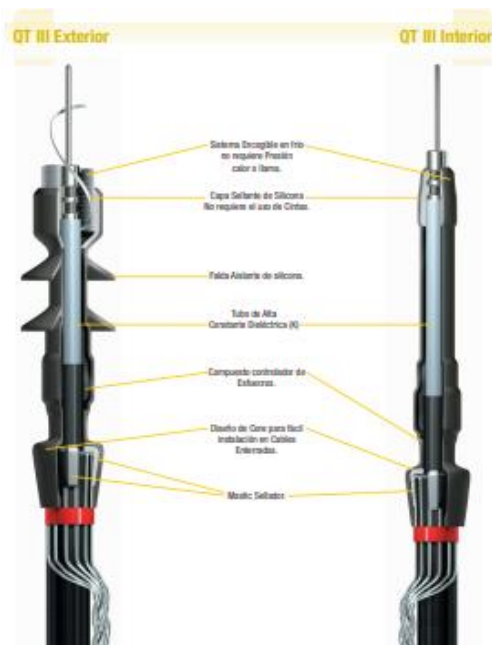
Terminal encogible en frío QT-III para interior y exterior serie 35 Kv Juego trifásico para cables con pantalla metálica de cinta o hilos								
Referencia	Diámetro exterior Del aislamiento Primario pulgadas (mm)	Rango de tamaños el conductor AWG y Kcmil					Stock Number	Unidad de Empaque
		5kV	8.7 kV	15kV	25/28kV	35kV		
7664-S-8	0.83-1.53 (21.1-38.9)	500-750	350-700	4/0-500	2/0-250	2-4/0	LE-0000-0565-8	1 Juego
7665-S-8	1.05-1.80 (26.7-45.7)	700-1500	600-1250	500-1000	250-800	3/0-600	LE-0000-0563-3	1 Juego
7666-S-8	1.53-2.32 (38.9-58.9)	1750-2000	1500-2000	1250-2000	900-1750	700-1500	LE-0000-0562-5	1 Juego

Nota: Tomado de "Catalogo terminal de Media Tensión" (3M).

De la Figura 33 escogemos el terminal 7664-S-8 de 35kV, marca 3M, QT-III. Dicho terminal no requiere grasa de silicona, cuenta con sello superior integrado, cuenta con una excelente resistencia del aislado al arco y al tracking (es 4 veces más resistente al tracking que el QT-II). En la Figura 34, podemos ver como seria el modelo de los terminales escogidos y en la figura 35 se ver un corte del terminal con el cable de media tensión.

Figura 34*Terminal MT*

Nota: Tomado de “*Catálogo terminal de Media Tensión*” (3M).

Figura 35*Terminal MT exterior e interior*

Nota: Tomado de “*Catálogo terminal de Media Tensión*” (3M).

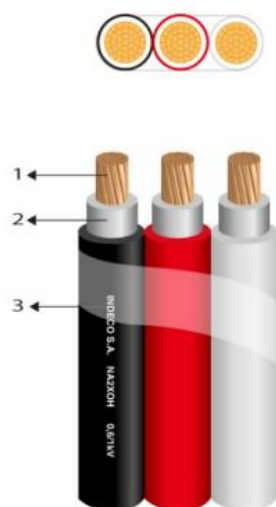
2.2.2 Dimensionamiento de cable de baja tensión

Se dimensionará el conductor que sale del secundario del transformador y va al tablero principal de baja tensión. Trabajaremos con el cable N2XOH, este es un cable libre de halógenos con capacidad máxima de 1kV y temperatura de operación de 90°C.

En la figura 36, tenemos en el punto 1 cobre blando, clase 2; en el punto 2 el aislamiento de Polietileno reticulado XLPE y en el punto 3, la cubierta externa de compuesto termoplástico libre de halógenos HFFR-UV.

Figura 36

Cable N2XOH, de la marca Indeco



Nota: Tomado de “Catalogo de cables N2XOH” (Indeco).

Intensidad de corriente admisible (I_{ad}):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} * V * \cos\phi} \quad (A) \quad (14)$$

$$I = \frac{630kVA}{\sqrt{3} * 380} = 0.958kA$$

Vamos a proceder a la selección del cable alimentador. Como podemos en la tabla 23, no hay calibre que con una sola terna cubra nuestra corriente admisible. Por lo que se procede a escoger dos ternas. A la capacidad de la doble terna se le aplica un factor de corrección por agrupamiento de 0,85.

Tabla 13

Se presenta los amperajes de los cables N2XOH de la marca INDECO.

Calibre	Capacidad corregida (3 cables unipolares en agrupación triangular)
300mm ²	703 A
400mm ²	823 A
500mm ²	946 A

Nota: Los datos han sido extradidos de las fichas técnicas de INDECO.

Aplicando un factor de corrección por agrupamiento obtenemos los valores de capacidad de corriente para 2 ternas. Estos datos han sido plasmados en la tabla 14.

Tabla 14

Tabla de capacidad amperimétrica para una terna y 2 ternas

Calibre	Capacidad corregida (1 terna en agrupación triangular)	Capacidad corregida (2 ternas en agrupación triangular)
300mm ²	703 A	1195 A
400mm ²	823 A	1399 A
500mm ²	946 A	1608 A

Nota: Los datos han sido obtenidos de la capacidad de doble terna has sido corregida con el factor de corrección por agrupamiento.

Con los resultados obtenidos seleccionamos 2 ternas de 300mm² N2XOH que tiene una capacidad de 1195A.

2.3 Dimensionamiento y selección de celdas modulares

Para la subestación proyectada se va a instalar una celda modular de remonte y una celda de protección con interrupto. Para la selección de celdas se trabajará con la marca Schneider.

Para la selección de las celdas modulares necesitamos la corriente nominal en MT, el voltaje nominal MT, corriente de corto circuito y corriente de choque.

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * U} \quad (15)$$

$$I_n = \frac{630kVA}{\sqrt{3} * 10kV} = 36.42A$$

Corrientes de cortocircuito (I_{cc}):

La corriente de cortocircuito haya con la potencia de cortocircuito (P_{cc}) que es suministrada por la concesionaria eléctrica.

$$I_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} * U} \quad (16)$$

$$I_{cc} = \frac{96MVA}{\sqrt{3} * 10kV} = 5.55kA$$

Corriente de choque:

Es el máximo valor que llegar a alcanzar la corriente de cortocircuito. Donde τ se toma un valor de 2.

$$I_{ch} = \sqrt{3} * \tau * I_{cc} \quad (17)$$

$$I_{ch} = \sqrt{3} * 2 * 5.55kA = 19.2kA$$

Tabla 15

Datos para la selección de las celdas modulares

In	Icc	I _{ch}	Vn
36.34 A	5.55Ka	19.2kA	24kV

Nota: Parámetros de trabajo.

2.3.1 Celda de remonte

En esta celda ingresan las acometidas de media tensión. Procedemos a la selección de una celda de remonte según los datos ya obtenidos en la tabla 15.

Escogemos la celda de remonte SM6 GAM-2, esta cuenta con una tensión nominal de 24kV, corriente de corto circuito admisible de 20kA e intensidad asignada (Ir) es de 630A.

Esta celda cuenta con un juego de barra para conexión de los cables de la acometida y conexión con barras de celdas adyacentes. También tiene unas luces led que indican la presencia de tensión. Este tipo de celdas son acoplables con otro tipo de celdas SM6.

Figura 37

Celda de remonte SM6



**Celda MT remonte de cables con
barraje tipo SM6 GAM-2 24kV,
630A, 20kA.**

SM61G2MHJ6R7PGAM2

Nota: Tomado de "Catalogo de celdas modulares SM6" (Schneider).

2.3.2 Celda de protección con interruptor de potencia

Interruptor de potencia MT de cumplir con los parámetros de la tabla 15.

Escogemos la celda MT interruptor Tipo SM6 DM1A, esta cuenta con una tensión nominal de 24kV, corriente de corto circuito admisible de 20kA e intensidad asignada (I_r) es de 630A.

Figura 38

Celda interruptor SM6



Celda MT interruptor tipo SM6 DM1A 220VAC, 24KV, 630A, 20KA, S20, 3TTIs, TPs, PM5560

SM61D1MHD6X7TITT2

Nota: Tomado de “Catalogo de celdas modulares SM6” (Schneider).

Esta celda cuenta con un seccionador de 3 posiciones que sería abierto, cerrado y tierra. La posición a puesta a tierra permite cortocircuitar las fases a tierra dando así más seguridad al hacer trabajos de mantenimiento.

2.4 Dimensionamiento del sistema de protección

2.4.1 Dimensionamiento de interruptor de potencia de MT

Corriente del interruptor de potencia MT (I_i) es el doble que la corriente nominal (I_n).

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * U} \quad (15)$$

$$I_n = \frac{630kVA}{\sqrt{3} * 10kV} = 36.42A$$

$$I_i = 2 * I_n = 72.83A$$

Tabla 16

Parámetros para la selección de interruptor de potencia MT

I_n	I_i	I_{cc}	I_{ch}
36.34 A	72.83 A	5.55kA	19.2kA

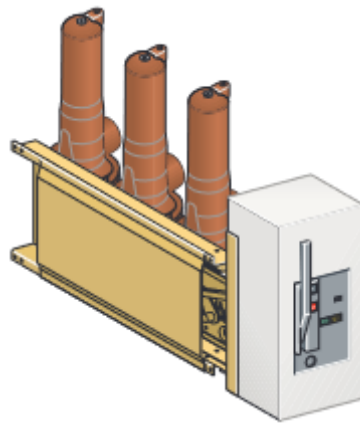
Nota: Parámetros de trabajo.

En la table 16 tenemos los parámetros mínimos para la selección de un interruptor de potencia.

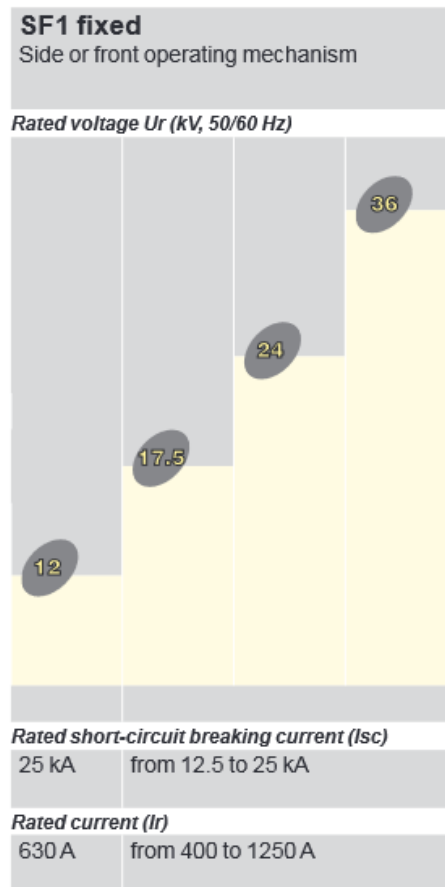
Escogemos el interruptor de potencia SF1 que es compatible con los modelos de celdas modulares SM6. Este cuenta con una corriente de cortocircuito de 25kA, una corriente asignada de 630A y un voltaje nominal regulable entre 12 y 36kV. Tanto el seccionador como el interruptor de potencia cuenta con el método de enfriamiento y extinción del arco eléctrico mediante el soplado del gas comprimido SF6. En la figura 39 podemos ver como es el interruptor y en la figura 40 se puede ver los parámetros de trabajo del fusible.

Figura 39

Interruptor de potencia MT SF1



Nota: Tomado de "Catalogo de celdas modulares SM6" (Schneider).

Figura 40*Parámetros de trabajo del interruptor SF1*

Nota: Tomado de “Catalogo de celdas modulares SM6” (Schneider).

Conclusiones

Se logro diseñar una subestación eléctrica de media a baja tensión para la alimentación de una carga de 450kW destina para un Data Center. La subestación es de tipo interior en donde se han implementado nuevas tecnologías como las celdas modulares de media tensión.

Para la selección de un transformador se tuvo en cuenta tanto las condiciones eléctricas como las ambientales. Su buena sección es crucial para que trabaje lo más eficiente y pueda trabajar de forma continua. El transformador seco es ideal para uso en Data Centers por el bajo ruido que emiten.

Para esta instalación se está utilizando celdas modulares de media tensión tipo SM6, que son celdas que se acoplan entre sí, permitiendo una rápida instalación. Además, cuenta con un gas tipo SF6, este mitiga la formación natural del arco eléctrico, dando así una mayor seguridad al momento de realizar maniobra en media tensión. Gracias a la forma compacta de las celdas modulares, el área destinada para la subestación a disminuido.

La selección de los cables de baja tensión se hizo teniendo en cuenta lo permitido según CNE, que es los libres de halógenos. Como el alimentador que va del transformador a el tablero principal consta de más de una terna, se debe tener en cuenta de corrección correspondiente según tabla de CNE. Al ser el tramo que recorre el alimentador muy corto, no se considera caída de tensión.

No se considera la selección de la acometida de media tensión debido a que eso es alcance de la concesionaria de distribución. El cable de media tensión a escoger cumple la función de conectar la celda tipo interruptor con el transformador de potencia. Al se el tramo muy corto, la caída de tensión es insignificante.

La correcta selección de los componentes de protección nos permitirá contar con más seguridad tanto para los componentes eléctricos como para los operadores. Los seccionadores contaran con 3 posiciones, abierto, cerrado y a tierra. La posición tierra nos permitirá cortocircuitar a tierra sin necesidad de abrir la carcasa protectora de la celda modular pudiendo así descarga de la subestación para poder realizar trabajos de manteniendo o algún cambio que requiera y cumpliendo también una de las 5 reglas de oro. Interrupto de potencia de media tensión es dimensionado con los parámetros nominales, corrientes nominales y de choque.

Referencias

Código Nacional de Electricidad Utilización (2006).

Enel distribución (2021). *Instructivo operativo*.

Huamán Rivas, G. L. (2023). *Diseño de una subestación eléctrica considerando el control de energía en un proceso minero*. Lima, Perú: Universidad Nacional de ingeniería.

Jiménez J. (2020). Dimensionamiento de subestación eléctrica de distribución 12/0.44-0.22kV para satisfacer la demanda de energía eléctrica en el nivel 15 de la unidad minera Casapalca- Huarochirí. Lima, Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLOGICA DEL SUR.

Rumiche Rumiche, P. V. (2022). *Subsistema de distribución primaria 22.9kV, trifásico y subsistema de distribución secundario 380/220V, trifásico, instalaciones de alumbrado publico y conexiones domiciliarias para la Asociación pro-vivienda y servicios múltiples de los trabajadores del Ministerio de salud (MINSA) Piura*. Piura, Perú: Universidad de Piura.

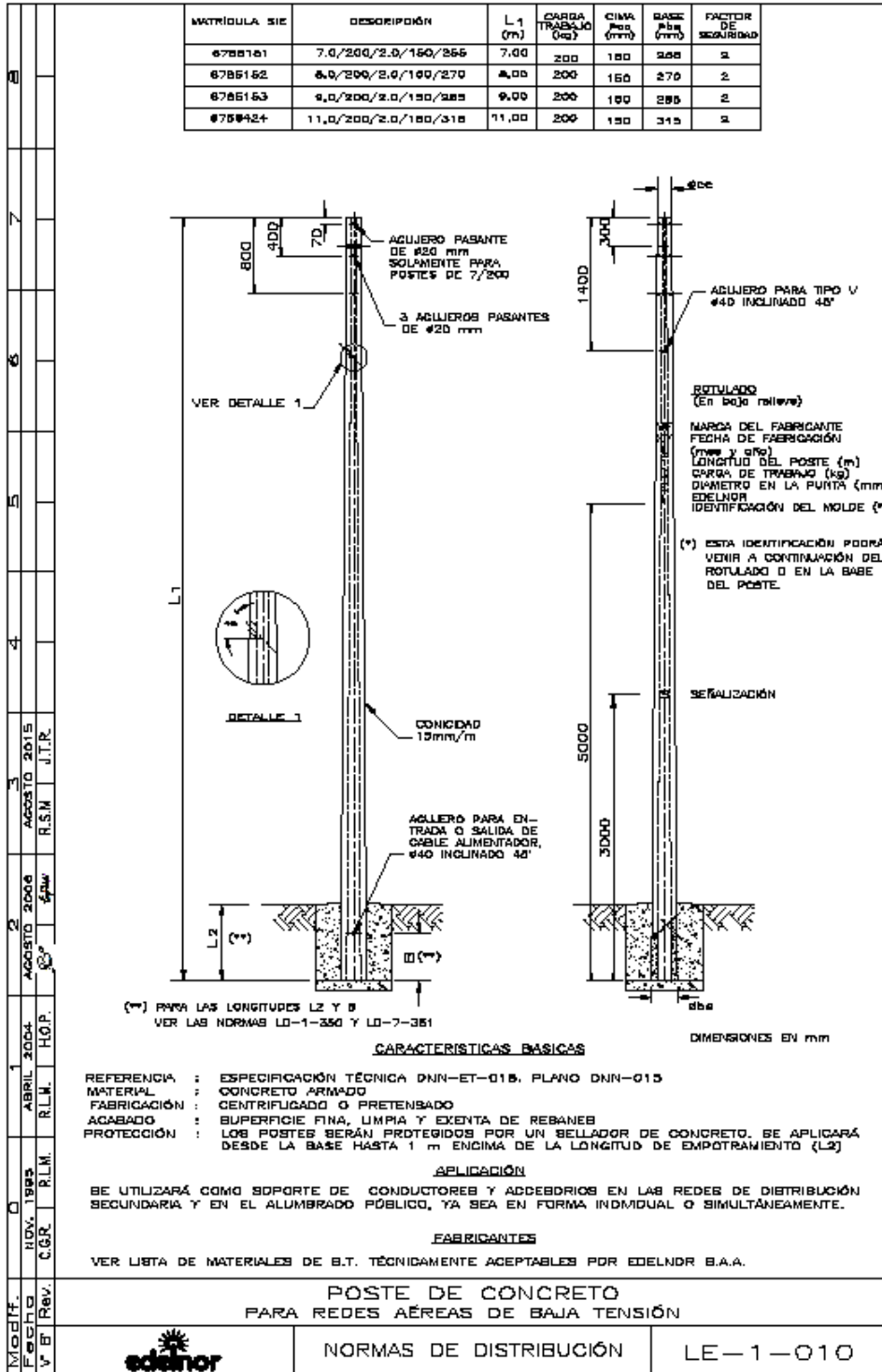


Anexos

Anexo A. Poste de concreto para redes aéreas de baja tensión

Figura 42

Postes de concreto de baja tensión

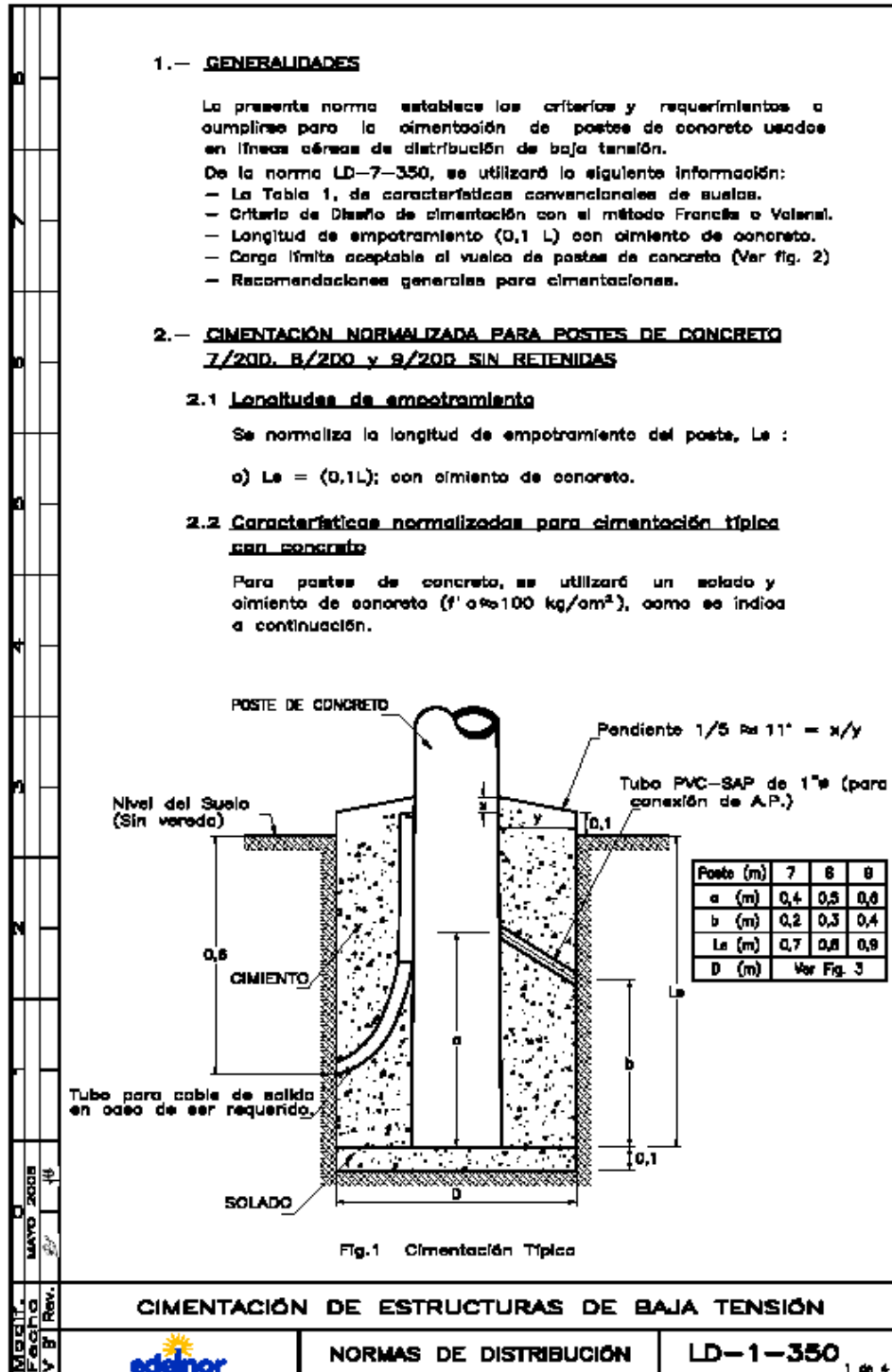


Nota. Los datos son extraídos de la base de diseño de Edelnor

Anexo B Cimentación de estructuras de baja tensión

Figura 43

Cimentación de postes de concreto de baja tensión



Nota. Los datos son extraídos de la base de diseño de Edelnor