

Análisis comparativo entre el cálculo
**en base a los estándares
IEC 60287 e IEC 60853.**
El modelamiento y
simulación en el software
Cymcap.



Estudio de cargabilidad de cables subterráneos en redes eléctricas de media tensión y propuesta para incrementar la ampacidad

Study on Ampacity of Underground Cables in Medium Voltage Electrical Networks and Proposal for Enhancement

RESUMEN

Este artículo presenta un análisis de los factores que determinan la cargabilidad de los cables subterráneos en redes de media tensión, las consideraciones y los resultados del cálculo de la capacidad, realizando un análisis comparativo entre el cálculo en base a los estándares IEC 60287 e IEC 60853 y el modelamiento y simulación en el software Cymcap.

Como aplicación se toman los tipos de cables, las condiciones de cargabilidad y las capacidades normadas de una empresa de distribución eléctrica del Perú, explicando los resultados y proponiendo la modificación de la forma de instalación de los cables unipolares para incrementar la capacidad de transmisión.

ABSTRACT

This article presents an analysis of the factors influencing the load capacity of underground cables in medium voltage networks. It discusses the considerations and results of capacity calculations, comparing the IEC 287 and IEC 853 standards with modeling and simulation using Cymcap software.

The study considers the types of cables, load conditions, and the rated capacities of an electricity distribution company in Peru, explaining the results and proposing a modification to the installation method of single-core cables to increase transmission capacity.



Palabras Claves

Ampacidad, cables de media tensión, redes subterráneas.

Key words

Ampacity, medium voltage cables, underground networks.

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de media tensión están compuestas por alimentadores, que pueden ser cables o conductores. Estos cables pueden ser aéreos o subterráneos. En este artículo se analiza los factores que determinan la cargabilidad de los cables subterráneos, entre los cuales destacan: la profundidad de instalación, la resistividad térmica del terreno, la temperatura ambiente, la temperatura nominal de operación del conductor y el factor de carga.

La mayoría de las empresas de distribución eléctrica dispone de información sobre el amperaje que circula por los alimentadores. Estos valores se comparan con las capacidades normadas para evaluar el factor de utilización de las redes y la sobrecarga. Sin embargo, las capacidades normadas se basan en las condiciones más críticas de funcionamiento de la red. Por ello, es necesario evaluar la cargabilidad de los cables, dado su impacto en el diseño, mantenimiento y asignación de cargas en los alimentadores. Definir adecuadamente las capacidades de los cables contribuye al aprovechamiento óptimo de las instalaciones existentes y a la correcta planificación de las inversiones.

En este artículo se analizan los tipos de cables y las condiciones de cargabilidad de una empresa de distribución. Los tipos de cables estudiados son los NKY y N2XSY. Los NKY son cables tripolares con aislamiento de papel impregnado en aceite, instalados en un nivel de tensión de 10 kV. Los N2XSY son cables unipolares con aislamiento XLPE, instalados en tensiones de 10 kV y 22,9 kV.

Las capacidades se calculan según los estándares IEC 287 «Cálculo de la intensidad admisible» [7] e IEC 853 «Cálculo de las capacidades de transporte de los cables para regímenes de carga cíclicos y sobrecargas de emergencia» [8].

En [3] se destaca que los cálculos de la IEC consideran la resistencia interna como constante y no contemplan el efecto del incremento de corriente en la resistencia térmica de las capas del conductor. En [18] se propone un método basado en elementos finitos que ofrece resultados más precisos sobre la evolución térmica al aumentar el amperaje en el cable. En [15] se analiza la influencia de la cubierta metálica en la ampacidad de los cables de potencia. En [9] se ofrece una visión integral sobre cómo factores externos al conductor afectan su ampacidad, incluyendo mediciones de laboratorio sobre la resistividad térmica del terreno. En [16] se aborda el impacto de la conductividad térmica del terreno en los cálculos de ampacidad, proponiendo modificar las características del *backfill* para mejorar la conductividad térmica y sugiriendo un análisis costo-beneficio. En [4] se estudia el impacto de conductores de baja tensión enterrados a menor profundidad y se evalúa el paralelismo de instalaciones, invitando a considerar distintos escenarios de instalación de cables de potencia. En [10] y [6] se destacan las ventajas de emplear el método de elementos finitos para los cálculos de ampacidad. En [2] se comparan diversos métodos de cálculo de ampacidad.

Por ello, las capacidades de los cables se calculan mediante modelado y simulación en el software Cymcap, que emplea elementos finitos para mejorar la precisión. Luego se realiza un análisis comparativo de los cálculos obtenidos y se explican los resultados. Se propone modificar la forma de instalación de los cables unipolares para aumentar su capacidad.

FUNDAMENTOS

Diversos factores determinan la cargabilidad de los cables, que se pueden agrupar en las características del terreno, del cable, de la instalación y de la demanda.

A. Características del terreno

El terreno juega un papel preponderante para el cálculo de la capacidad de los cables, es el medio donde los cables se encontrarán inmersos.

a. Resistividad térmica

La resistividad térmica es un indicador de la oposición a la propagación del calor y se calcula mediante la siguiente expresión [8]:

$$\frac{10^{-3}}{\delta \cdot d(0,82 + 0,042\eta)} K.m/W \quad (1)$$

δ : Difusividad térmica (m^2/s)

d : Masa volumétrica en seco (kg/m^3)

η : contenido de humedad de la masa seca (%)

La figura 1 muestra la relación entre la difusividad y la resistividad térmica del terreno para valores de humedad y masa volumétrica estándar.

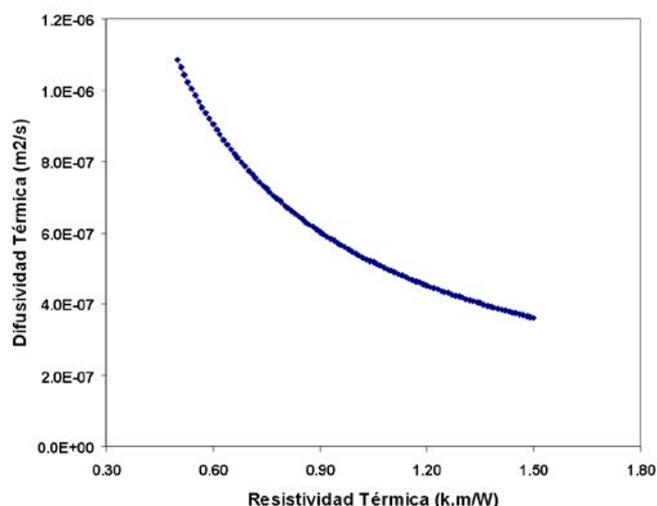


Figura 1. Difusividad vs. resistividad

Fuente: Elaboración propia.

Se sugiere utilizar un valor de difusividad térmica de $0,5 \times 10^{-6} m^2/s$ cuando se desconoce el terreno [8], lo que nos da una resistividad térmica aproximada de 1 Km/W. Para un cálculo conservador, se puede considerar una resistividad de 1,2 Km/W. La reducción de la resistividad térmica mejora la cargabilidad del cable. En [17] se estudia la composición y naturaleza del suelo en relación con las plantas y el entorno circundante, los elementos gruesos que pueden encontrarse y su vínculo con la variación de la resistividad térmica del terreno. En [5], se analiza el efecto de la formación de una zona seca alrededor de los cables subterráneos, considerándola un factor limitante para la capacidad de conducción.

b. Humedad

El suelo, desde el punto de vista hidrológico, actúa como un depósito de agua cuya capacidad de retención y almacenamiento depende de sus propiedades físicas. La figura 2 muestra la clasificación de los suelos según este enfoque.

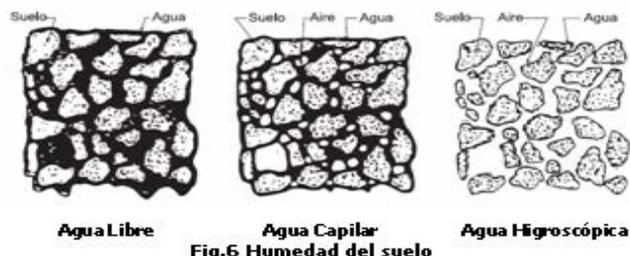


Figura 2. Humedad del suelo

Fuente: [11]

La cohesión del suelo se debe al agua absorbida que rodea sus partículas. Atterberg propone el esquema mostrado en la figura 3 y desarrolla un método que emplea distintos grados de contenido de humedad. Con un contenido muy bajo de humedad, el suelo se comporta como un sólido, mientras que, con un alto contenido, suelo y agua pueden fluir como un líquido.

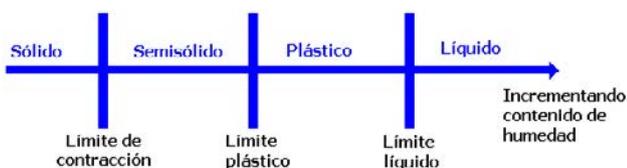


Figura 3. Límite de Atterberg

Fuente: [14].

El incremento de la humedad en el suelo favorece la cargabilidad.

c. Consistencia

El arreglo geométrico de las partículas del suelo en relación unas con otras depende de factores como la forma, el tamaño y la mineralogía de las partículas, así como de la naturaleza y composición del agua. La figura 4 muestra algunos de estos arreglos.

• Estructuras en suelos granulares

En la estructura de grano individual, las partículas del suelo están en una posición estable, en contacto unas con otras. La forma y la distribución del tamaño de las partículas influyen en la densidad.

• Estructura panaloide

En la estructura de celdas, las arenas finas y los limos forman pequeños arcos con cadenas de partículas. Presentan altos índices de vacíos y pueden soportar cargas estáticas normales. Sin embargo, bajo cargas pesadas o impactos, la estructura colapsa, lo que provoca grandes asentamientos.

• Estructura en suelos cohesivos

Existen varios tipos de estructuras en suelos cohesivos, entre las principales se encuentran las siguientes:

- Estructura dispersa: Las partículas individuales pueden asentarse muy lentamente, experimentando un movimiento browniano (en zigzag).
- Estructura floculante: Las partículas tienden a agruparse en flóculos visibles. El contacto entre partículas es cara-borde, con grandes vacíos, lo que la hace colapsable. Las uniones son electrostáticas.
- Estructura floculante tipo sal: Tienen un peso ligero y una alta relación de vacíos. Su estructura es colapsable cuando la sal se disuelve en agua dulce.

• Textura del suelo

La variedad de los suelos está dada por las combinaciones de los tipos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1
Textura del suelo

Tipo	Partículas con diámetro
Pedregoso	Mayor a 20 mm
Gravosos	Entre 2 y 20 mm
Arenas gruesas	Entre 0,2 y 2 mm
Arenas finas	Entre 0,02 y 0,2mm
Limos	Entre 0,002 y 0,02mm
Arcillas	Menor a 0,0002 mm

Fuente: Elaboración propia.

El incremento de la compactación no favorece la cargabilidad.

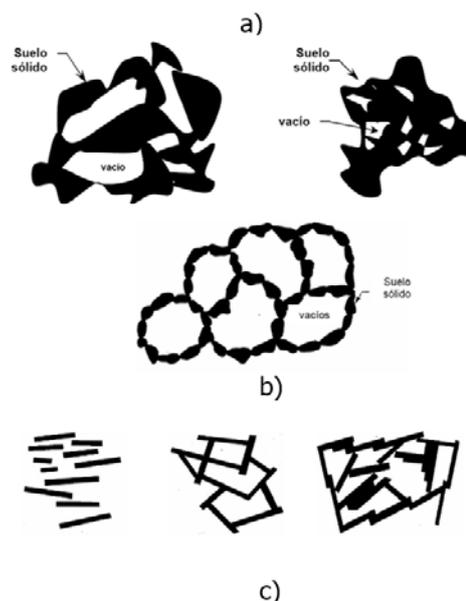


Figura 4. Consistencia de los suelos a) Estructuras de suelos granulares. b) Estructura panaloide. c) estructura de suelos cohesivos.

Fuente: Elaboración propia.

d. Composición

Los suelos son sistemas compuestos por tres componentes básicos: sólido, líquido y aire. La figura 5 muestra las proporciones utilizadas para obtener indicadores sobre la composición del suelo.

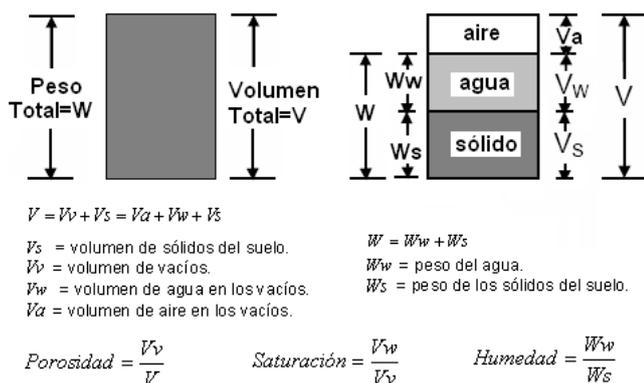


Figura 5. Composición del suelo

Fuente: [15].

B. Características del cable

a. Aspectos constructivos

• Capas

Un cable tiene, como mínimo, tres componentes: conductor, aislamiento y cubierta. En algunos casos, puede incluir más capas, como semiconductores sobre el conductor y el aislamiento, pantallas metálicas o recubrimientos adicionales. Cualquiera que sea su finalidad, es fundamental dimensionar adecuadamente cada capa y su espesor.

• Aislamiento

El espesor del aislamiento varía con el nivel de tensión al que será sometido el cable, a mayor tensión más espesor.

c. Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de cables ha evolucionado con el tiempo. Al principio, la producción era más artesanal, lo que presentaba desventajas, como la contaminación. En una misma área de la fábrica se fabricaban diferentes tipos de cables, y las partículas del aislamiento de un cable se mezclaban con las de otro, provocando reacciones químicas que afectaban la capacidad, haciéndola mayor o menor de lo especificado en condiciones normales. Debido a la falta de instrumentos de precisión, los espesores de las capas presentaban un error porcentual de hasta un 8 %, usualmente por exceso. Esta irregularidad en los espesores impedía que las capas se compactaran correctamente, lo que generaba vacíos y, en consecuencia, alteraba la capacidad y la duración del cable. Con la llegada de las máquinas extrusoras y la optimización de los procesos, estos problemas fueron superados.

• Materiales

En el proceso de fabricación, es crucial el valor de la resistencia a 20 °C en corriente continua, ya que este determina las pérdidas y el grado de calor que disipa el conductor para un amperaje específico. Esto, independientemente del aumento de la resistencia en función de la temperatura, definido por lo siguiente:

$$R_t = R_{20^{\circ}C} [1 + \alpha_{20^{\circ}C} (t - 20)] \quad (2)$$

En algunos casos, se coloca un recubrimiento metálico sobre el conductor, con un espesor inferior a 0,1 mm. Este incrementa

la resistencia del conductor entre un 0,51 % y un 2,82 % (dependiendo de la sección). Su función es proteger contra la corrosión y reducir los efectos del campo magnético generado por el paso de la corriente.

b. Aspectos térmicos

La transferencia de calor sigue una ley fundamental de la física: siempre fluye del objeto más caliente al más frío. La tasa de transferencia depende de varias variables y se describe mediante una ecuación térmica similar a la Ley de Ohm, en la que la tensión se reemplaza por la diferencia de temperatura, la corriente por el flujo de calor generado por la potencia disipada del conductor, y la resistencia por la resistividad térmica equivalente [13].

$$TC - TA = WxR_{eqCA} \quad (3)$$

Donde:

- TC : Temperatura en el conductor.
- TA : Temperatura de ambiente o del suelo.
- W : Potencia disipada I^2R siendo R la resistencia eléctrica del conductor.
- R_{eqCA} : Resistencia térmica equivalente entre el conductor y el ambiente.

Entonces la corriente máxima que considerará los efectos térmicos en el conductor estará dada por:

$$I = \sqrt{\frac{TC - TA}{R_{eqCA} R}} \quad (4)$$

Las capas de un cable forman distintas superficies térmicas, lo que permite representar al cable como un circuito térmico equivalente. Para entender mejor la capacidad de corriente, es necesario examinar cómo se transfiere el calor y los circuitos térmicos que se generan en un conductor que transporta corriente. En la figura 6, T1, T2, T3 y T4 representan resistividades térmicas, siendo T4 la de mayor magnitud.

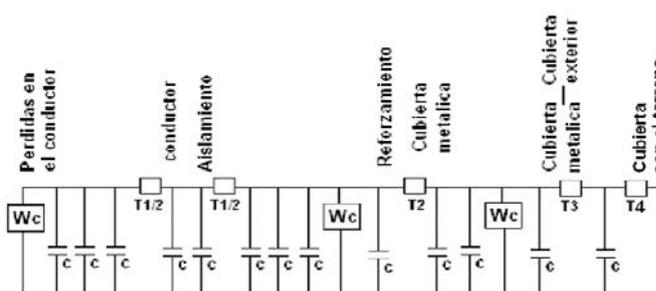


Figura 6. Circuito térmico equivalente

Fuente: [1].

C. Características de la instalación

a. Profundidad

La profundidad de instalación de los cables influye directamente en su capacidad: a mayor profundidad, menor capacidad. Es importante destacar que, en algunos casos, la profundidad de instalación también depende de factores como las distancias mínimas de seguridad, cruces, la coexistencia con sistemas de

cables telefónicos en la misma vía y disposiciones municipales o jurisdiccionales.

b. Temperatura de ambiente

A mayor temperatura ambiente, menor es la capacidad. Además, se considera la temperatura del suelo para determinar dicha capacidad.

c. Materiales de relleno de la zanja

Los materiales de relleno de la zanja, su compactación y su resistividad térmica influyen directamente en la capacidad del cable. Antes de la instalación, el terreno presenta un valor de resistividad. Al instalar los cables, la porción de tierra retirada se criba, se coloca en la zanja y se compacta. Como resultado, el terreno tendrá un equivalente de las resistividades térmicas: la original y la de la porción retirada, como se muestra en la figura 7. La resistividad térmica que tendrá mayor influencia será R_1 .

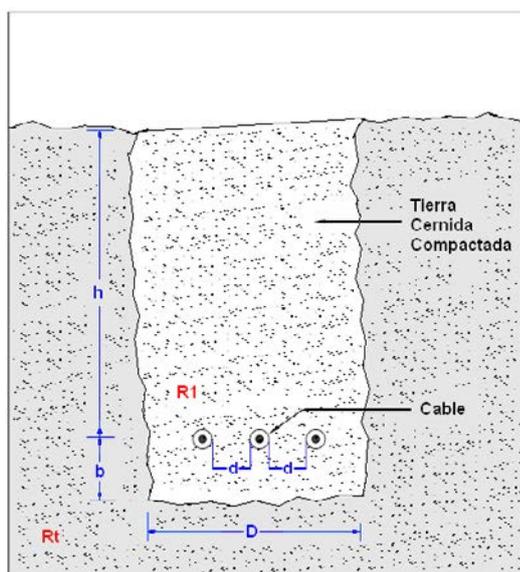


Figura 7. Características de la instalación

Fuente: Elaboración propia.

D. Características de la demanda

El comportamiento de las cargas y su tipo influye en la cargabilidad de los cables.

a. Diagrama de carga

La potencia disipada por el cable depende de la corriente, y el paso de esta incrementa la temperatura. Como la demanda varía a lo largo del día, el cable opera a diferentes temperaturas. En [8], se menciona que, al final de un periodo continuo de 6 horas, se alcanza la máxima temperatura en el cable. Es importante señalar que esta máxima temperatura no necesariamente coincide con la demanda máxima. Desde este punto de vista, el cable puede manejar diagramas de carga con algunos picos de corriente, siempre que estos no hagan que la temperatura del cable exceda su temperatura de operación nominal. Un indicador útil para evaluar la cargabilidad es el factor de carga, definido como:

$$FC = \frac{I_p}{I_m} \tag{5}$$

Donde:

- FC : Factor de carga.
- I_p : Corriente promedio.
- I_m : Corriente máxima.

Cuando un diagrama de carga es plano, el factor de carga se aproxima al 100 %, y el incremento de temperatura es continuo. Los fabricantes de cables proporcionan la capacidad basada en un factor de carga del 100 %. Sin embargo, en la práctica, el factor de carga suele ser inferior al 100 %, lo que permite que el cable soporte un mayor amperaje que el especificado por el fabricante. Conociendo el factor de carga, es posible determinar la demanda máxima admisible por el cable sin comprometer su vida útil. La figura 8 ilustra gráficamente estos conceptos.

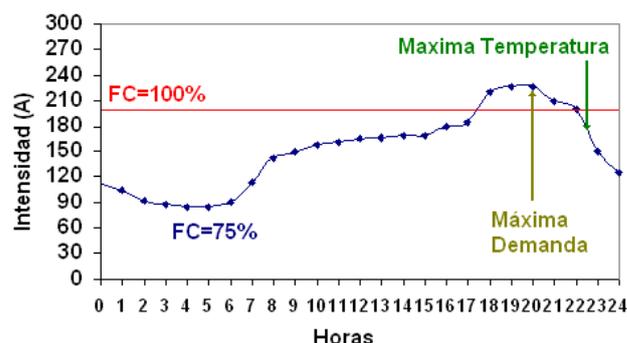


Figura 8. Comportamiento de la carga

Fuente: Elaboración propia.

Los cables, en sus especificaciones, indican un porcentaje de sobrecarga que pueden soportar durante un número determinado de horas a lo largo de su vida útil. Estas especificaciones incluyen tanto el porcentaje de sobrecarga como la cantidad de horas continuas por día en que se puede aplicar dicha sobrecarga. Bajo estas condiciones, el cable opera a la temperatura de emergencia.

b. Tipo de carga

Existen dos tipos de cargas bien diferenciadas: las lineales y las no lineales. Las cargas no lineales generan componentes armónicos que aumentan tanto la corriente como la temperatura del conductor, lo que incrementa las pérdidas. Un análisis del aumento de las pérdidas en cables debido al paso de armónicos se muestra en [12].

METODOLOGÍA

Cálculo de cargabilidad de los cables NKY

A. Geometría del cable

La figura 9 muestra la geometría de los cables NKY, junto con las resistencias térmicas aplicables para el cálculo de su capacidad. También se incluye el cálculo del diámetro del cable.

B. Datos para el cálculo

B1. Datos de instalación

Profundidad de instalación: 1 m

Resistividad térmica del terreno: 1,5 °C m/W
 Temperatura de ambiente: 25 °C
 Nivel de tensión: 10 kV.

B2. Datos del conductor

Tipo de cable: Tripolar
 Conductor: Cobre
 Aislamiento: Papel impregnado en aceite
 Chaqueta: de Plomo
 Cubierta: Termoplástico PVC
 Temperatura de operación normal: 70 °C
 Temperatura de operación en emergencia: 90 °C
 Las dimensiones son mostradas en la tabla 2.

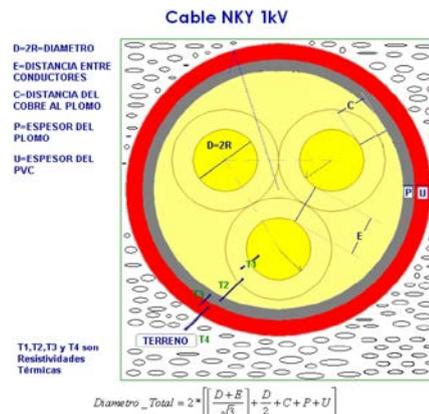


Figura 9. Geometría del cable NKY

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
 Dimensiones de los cables NKY

Sección (mm ₂)	φ conductor (mm)	Espesor Aislamiento (mm)		Espesor de Pb (mm)	Espesor PVC (mm)	φ exterior (mm)
		Entre conductores	Del Cu al Pb			
16	4,5	6,1	4,5	1,5	1,9	32,5
35	6,7	6,1	4,5	1,7	2,1	36
70	9,4	6,1	4,5	1,7	2,3	44,2
120	12,4	6,1	4,5	1,9	2,6	51,7
240	17,5	6,1	4,5	2,3	3,0	64,2

Fuente: Elaboración propia.

C. Resultados comparativos para factor de carga 100 %

La tabla 3 muestra la comparación de los cálculos realizados para factor de carga 100 %.

Tabla 3
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 100 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 287	Cálculo Cymcap
16	74	76
35	116	116
70	171	168
120	235	229
240	348	333

Fuente: Elaboración propia.

D. Resultados comparativos para factor de carga 75 %

La tabla 4 muestra los resultados del cálculo para FC = 0,75.

Tabla 4
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 75 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 853	Cálculo Cymcap
16	81	81
35	129	126
70	192	182
120	268	252
240	380	368

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los valores calculados son muy cercanos, pero en todos los casos los valores obtenidos con el software Cymcap son inferiores a los de la norma IEC. Aunque la formulación matemática del software se basa en las normas IEC, la diferencia se debe a que Cymcap utiliza elementos finitos en su proceso de cálculo, lo que le permite mayor precisión.

3.2 Cálculo de cargabilidad de los cables N2XSJ

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de la capacidad de los cables N2XSJ, según su geometría, las normas aplicables y la simulación realizada con el software Cymcap.

A. Geometría del cable

La figura 10 muestra la geometría de los cables N2XSJ, junto con las resistencias térmicas aplicables para el cálculo de su capacidad. También se incluye el cálculo del diámetro del cable.

B. Datos para el cálculo

a. Datos de instalación

Profundidad de instalación: 1 m
 Resistividad térmica del terreno: 1.5 °C m/W
 Temperatura de ambiente: 25 °C
 Nivel de tensión: 10 kV y 22,9 kV

b. Datos del conductor

Tipo de cable: Unipolar
 Conductor: Cobre
 Aislamiento: XLPE

Capas de semiconductor extrudido antes y después del aislamiento

Chaqueta: Pantalla metálica de cobre recocido
 Cubierta: Termoplástico PVC
 Temperatura de operación normal: 90 °C
 Temperatura de operación en emergencia: 130 °C
 Las dimensiones de son mostradas en la tabla 5.

Tabla 5
 Dimensiones de los cables N2XSY

Sección (mm ₂)	ϕ conductor (mm)	Espesor del aislamiento (mm)	ϕ Sobre el aislamiento (mm)	Espesor PVC (mm)	ϕ exterior (mm)
25	5	4,5	15	1,8	21
35	7	4,5	16	1,8	22
70	10	4,5	17	1,8	26
120	13	4,5	22	1,9	31
240	19	4,5	28	2,0	37

Fuente: Elaboración propia.

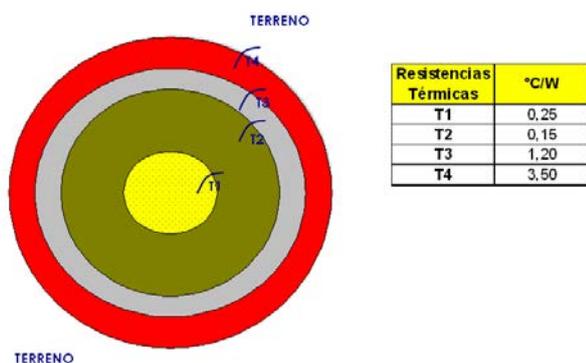


Figura 10. Geometría del cable N2XSY

Fuente: Elaboración propia.

C. Resultados comparativos para factor de carga 100 %

La tabla 6 muestra las capacidades normadas para estos cables.

Tabla 6
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 100 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 287	Cálculo Cymcap
16	133	139
35	159	165
70	230	235
120	314	314
240	459	443

Fuente: Elaboración propia.

D. Resultados comparativos para factor de carga 75 %
 La tabla 7 muestra los resultados del cálculo para FC=0,75.

Tabla 7
 Cuadro comparativo de las capacidades a factor de carga 75 %

Sección (mm ₂)	Cálculo IEC 853	Cálculo Cymcap
16	162	160
35	194	190
70	284	273
120	393	370
240	585	524

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que los valores calculados con un factor de carga del 100 % son muy similares. Las principales diferencias se encuentran en los valores con un factor de carga del 75 %. La figura 11 muestra la variación de las capacidades al aumentar la sección del cable, observándose una mayor diferencia en los cálculos basados en la norma IEC a medida que la sección incrementa.

El cálculo realizado con el *software* Cymcap es más preciso porque utiliza elementos finitos. En esta configuración (tres cables unipolares), cada uno actúa como una fuente de calor. La capacidad de corriente que puede transmitir la terna se define cuando el conductor central alcanza su temperatura de operación nominal.

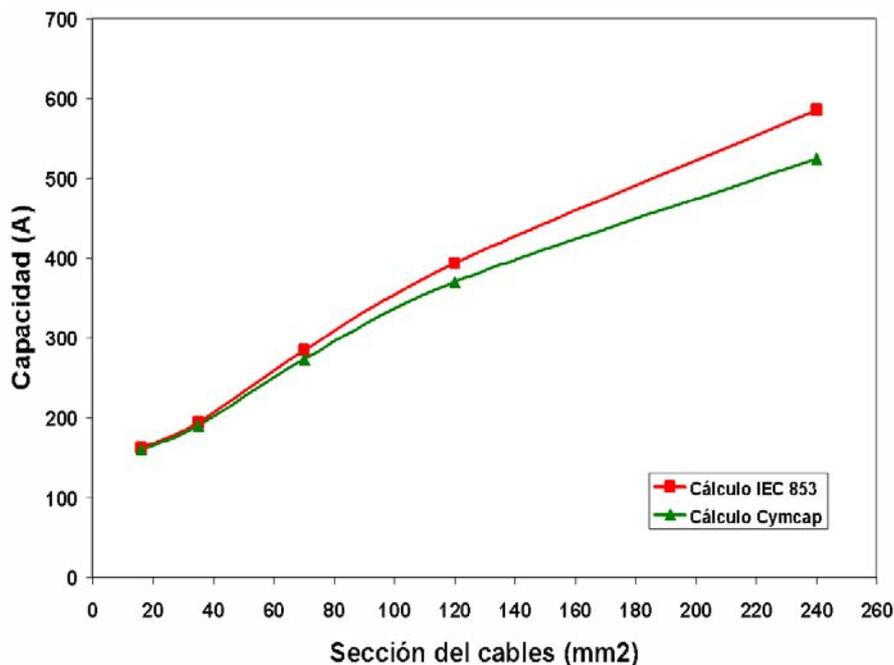


Figura 11. Variación de las capacidades calculadas para factor de carga 75 %

Fuente: Elaboración propia.

PROPUESTA PARA EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE LOS CABLES N2XSY

La tabla 8 muestra la variación de la capacidad de una terna a medida que separamos los cables en forma horizontal y vertical.

Esto indica que levantar el cable central 5 cm equivale a separar 20 cm los cables entre sí. Si se eleva el cable central 10 cm, la mejora es aún mayor. Desde el punto de vista de la instalación, podría evaluarse la colocación de un ladrillo como soporte para el cable central, de modo que la instalación sea estable. Este componente puede colocarse a intervalos regulares a lo largo del tendido subterráneo, reduciendo los costos de instalación. En la disposición horizontal, el cable central recibe directamente el calor de los cables adyacentes; al levantarlo, el centro de calor se desplaza a una posición que no afecta directamente a ninguno de los cables. La figura 12 muestra tanto la configuración actual como la propuesta.

Tabla 8

Cuadro comparativo de las capacidades que se obtienen al cambiar la configuración de los cables N2XSY

Disposición	Capacidad (A)
Cables juntos (horizontal)	352
Cables juntos (triangular)	357
Cables a 5 cm	359
Cables a 7 cm (actual)	364
Cables a 10 cm	369
Cables a 15 cm	375
Cables a 20 cm	380
Cable central a 95 cm	381
Cable central a 90 cm	391

Fuente: Elaboración propia.

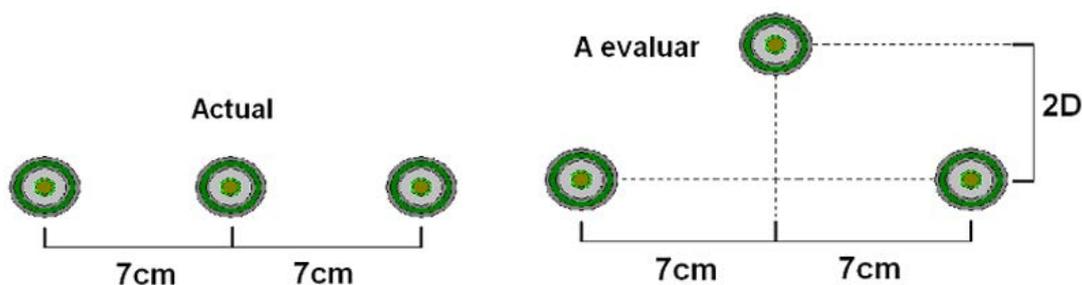


Figura 12. Configuración actual y propuesta

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este artículo podemos destacar las siguientes conclusiones:

- El análisis de la cargabilidad de los cables y su formulación matemática se basan en la transferencia de calor.
- Los factores que determinan la cargabilidad de un cable son su diseño, construcción, el medio circundante, las características de su instalación y la demanda.
- El terreno en el que se instalan los cables desempeña un papel crucial en la determinación de la capacidad. A mayor resistividad térmica, menor es la capacidad.
- En cuanto a las características del cable, los factores que más influyen en su capacidad son la resistencia DC del conductor a 20 °C y las pérdidas dieléctricas, mientras que la precisión en los espesores de las capas del cable no tiene un impacto significativo en las secciones analizadas.
- En cuanto a la instalación, los cables pierden capacidad a medida que se instalan a mayor profundidad.
- Los valores calculados con el *software* Cymcap son más precisos debido al uso del método de elementos finitos.
- En la configuración propuesta para los cables N2XSY, levantar el cable central 5 cm es equivalente a separar los cables 20 cm entre sí, lo que incrementa la capacidad de conducción de la terna en un 4,67 %.

Apéndice A: Ejemplo de cálculo de la capacidad del cable 70NKY

Cálculo según normas IEC

A1. Cálculo a FC 100 % (IEC-287-1, IEC-287-2)

La fórmula del cálculo de la capacidad de corriente para cables de cobre es la siguiente:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d [0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (6)$$

Donde:

- I: Es la intensidad de corriente que circula por el conductor (A).
- $\Delta\theta$: Es el calentamiento del conductor con respecto a la temperatura admisible (K).
- R: Es la resistencia del conductor bajo los efectos de la corriente alterna, por unidad de longitud, a temperatura máxima de operación (ohm/m).
- Wd: Son las pérdidas dieléctricas, por unidad de longitud, del aislamiento que rodea al conductor (W/m).
- T1: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, entre el conductor y el aislante (K.m/W).
- T2: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, entre el aislante y la armadura (K.m/W).
- T3: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, de la cubierta externa del cable (K.m/W).
- T4: Es la resistencia térmica, por unidad de longitud, entre la cubierta externa del cable y el medio en donde se encuentra enterrado el cable (K.m/W).
- n: Es el número de conductores aislados en servicio en el cable

(conductores de la misma sección transportando la misma carga).

Es la relación de pérdidas en la cubierta metálica o pantalla respecto a las pérdidas totales en todos los conductores de ese cable.

λ_2 : Es la relación de pérdidas en la armadura respecto a las pérdidas totales en todos los conductores de ese cable.

Cálculo de $\Delta\theta$: $\Delta\theta = 70 - 25 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

Cálculo de Wd: Wd=0

Cálculo de R:

$$R = R_o (1 + y_s + y_p) (1 + \alpha_{20} (T_{m\acute{a}x} - 20)) \quad (7)$$

Ro: Resistencia del conductor en corriente continua a 20 °C

ys: Es el factor por efecto pelicular.

yp: Es el factor por efecto de proximidad.

acu = $3,93 \times 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$

Ro = 0,000268 Ω/m

Efecto Skin:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} \quad (9)$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f}{R_o (1 + \alpha_{cu} (70 - 20))} 10^{-7} k_s \quad (10)$$

ks = 1

Efecto proximidad:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0,312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8x_p^4} + 0,27} \right] \quad (12)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_o (1 + \alpha_{cu} (70 - 20))} 10^{-7} k_p$$

kp = 0,8

R = 0,0003211 Ω/m

Cálculo de las resistencias térmicas T1, T2, T3 y T4:

T1 = 0,26835 K.m/W

T2 = 0,34874 K.m/W

T3 = 0,21387 K.m/W

T4 = 3,26863 K.m/W

Reemplazando valores en la ecuación 6 con n=1, $\lambda_1=0$, $\lambda_2=0$, tenemos:

$$I = \left[\frac{(70 - 25) - 1,696(0,5 \times 0,26835 + 0,34874 + 0,21387 + 3,26863)}{0,0003211 \times (0,26835 + 0,34874 + 0,21387 + 3,26863)} \right]^{0,5} \quad I = 170,5 \text{ A}$$

A2. Cálculo a FC 7 5% (IEC-853)

Dentro de las alternativas de cálculo que presenta la norma IEC -853, tomamos la siguiente:

Ciclo de carga de forma desconocida, en el cual solo es conocido el factor de carga de las pérdidas μ . En este caso, puede ser demostrado que el ciclo puede considerarse como puesto a carga máxima a un valor constante, y que puede ser utilizada la ecuación (13).

$$M = \frac{1}{(1 - k(1 - \mu)[1 - \beta(6)])^{0,5}} \quad (13)$$

Donde:

M : Factor de aumento a la corriente nominal.

k : Relación entre la elevación de la temperatura por encima de la temperatura ambiente de la superficie exterior del cable y la elevación de la temperatura del conductor por encima de la de ambiente en régimen permanente.

μ : Factor de carga.

$\beta(6)$: Factor de aproximación de la temperatura de la superficie exterior del cable en el período de (6) horas.

Cálculo de k :

$$k = \frac{WT_4}{\theta(\infty)}$$

$$k = \frac{28,16761 \times 3,26863}{70 - 25} = 2,0459 \quad (14)$$

Cálculo de $\beta(6)$:

$$\beta(i) = \frac{-E_i \left(-\frac{D_e^2}{16t\delta} \right)}{2 \ln \left(\frac{4L}{D_e} \right)} \quad (15)$$

$$D_e = 42,33 \text{ mm}$$

$$t = 3600 \times 6 \text{ s}$$

$$L = 1000 \text{ mm}$$

$$\frac{D_e^2}{16t\delta} = \frac{42,33^2}{16 \times 3600 \times 0,4 \times 10^{-6}} = 0,0777$$

Según el nomograma:

$$-E_i(-x) = -\ln(x) + \sum_{i=0}^5 a_i x^i = 5,306$$

$$\beta(6) = \frac{5,306}{2 \ln \left(\frac{4 \times 1000}{42,33} \right)} = 0,5832$$

Con los datos obtenidos, finalmente:

$$M = \frac{1}{(1 - 2,0459(1 - 0,75)(1 - 0,5832))^{0,5}} = 1,127$$

Entonces la corriente, a factor de carga 0,75 para un cable de cobre 70mm₂ NKY, 10 kV, es la siguiente:

$$I = 1,127 \times 170,5$$

$$I = 192,2$$

Cálculo con el software Cymcap

Para simular un cable en el software Cymcap, se siguen los siguientes pasos:

- Diseño del cable: Se identifica el cable con un nombre y se ingresan los parámetros correspondientes a las capas y materiales que lo componen.
- Diseño de la instalación del cable: Se crea el entorno donde se instalará el cable, especificando la resistividad térmica del terreno y su posición en el plano (X, Y).
- Luego, se definen las condiciones de carga, el factor de carga y los diagramas correspondientes.
- Finalmente, se simula el sistema para diferentes factores de carga (en este caso, FC = 1 y FC = 0,75) y se presentan los resultados. La figura 13 muestra los resultados de la simulación para el cable 70 NKY.

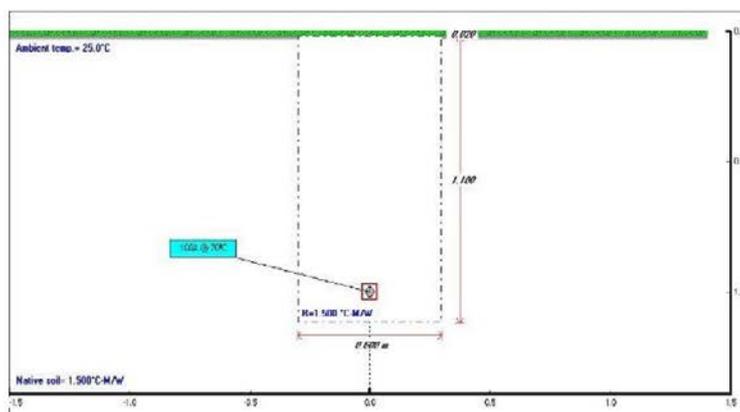
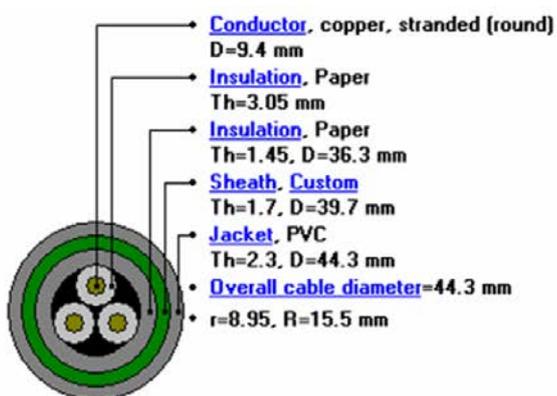


Figura 13. Simulación del cable 70 NKY

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice B: Ejemplo de cálculo de la capacidad del cable 240N2XSJ

Cálculo según normas IEC

A1. Cálculo a FC 100 % (IEC-287-1, IEC-287-2)

Para realizar este cálculo se sigue el procedimiento de los apéndices A.1 y A2, así como las consideraciones de la norma.

$$\text{Cálculo de } \Delta\theta: \Delta\theta = 90 - 25 = 65 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Cálculo de } W_d: W_d = 0$$

$$\text{Cálculo de } R: R = 0,000098533 \Omega/\text{m}$$

Cálculo de las resistencias térmicas T1, T2, T3 y T4:

$$T1 = 0,21600 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$$

$$T2 = 0 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$$

$$T3 = 0,09373 \text{ (K}\cdot\text{m}/\text{W)}$$

$$T4 = 2,81773 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$$

Reemplazando valores en la ecuación 6 con $n=1$, $\lambda_1=0$, $\lambda_2=0$, tenemos a continuación:

$$I = \left[\frac{(90 - 25) - 0}{0,000098533 \times (0,21600 + 0,09373 + 2,81773)} \right]^{0,5} I = 459,4$$

A2. Cálculo a FC 75 % (IEC-853)

Dentro de las alternativas de cálculo que presenta la norma IEC-853, tomamos la siguiente:

$k = 2,792$

$\beta(6) = 0,432$

$$M = \frac{1}{(1 - 2,792(1 - 0,75)(1 - 0,432))^{0,5}} = 1,274$$

Entonces, la corriente a factor de carga 0,75 para un cable de cobre 6mm₂ NKY, 1kV es la siguiente:

$I = 1,274 \times 459$

$I = 585$

Cálculo con el software Cymcap

La figura 14 muestra los resultados de la simulación para el cable 240N2XS_Y.

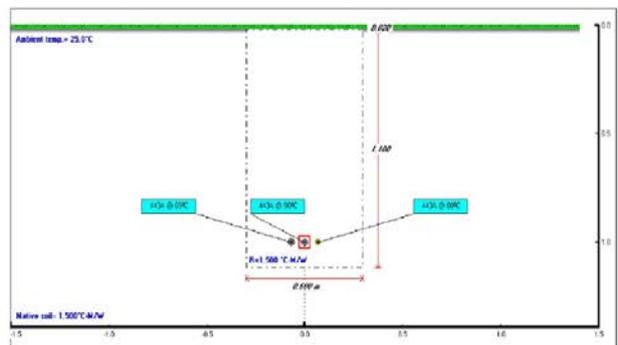
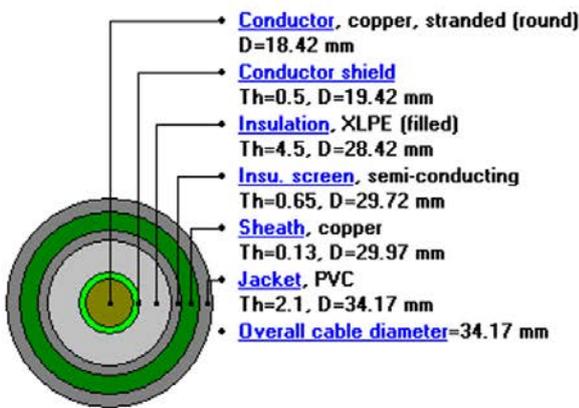


Figura 14. Simulación del cable 240N2XS_Y

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice C: Cables de MT en condición de agrupamiento

Cables de media y baja tensión en una misma zanja

La figura 15 muestra la condición en que los cables de MT se encuentran con los cables de BT.

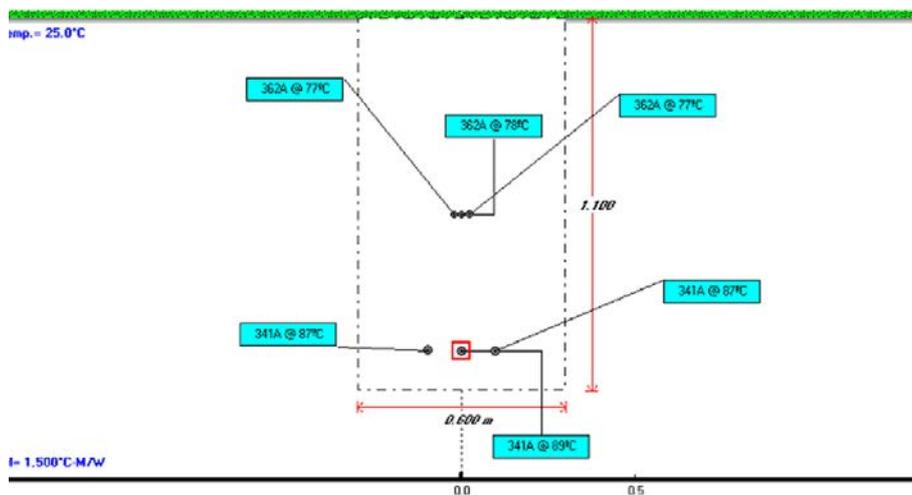


Figura 15. Cables en agrupamiento MT y BT

Fuente: Elaboración propia.

En esta configuración, los cables de media y baja tensión ven disminuida su capacidad debido a la presencia de más fuentes de calor en el mismo entorno. En comparación con el cálculo de la capacidad de los cables de forma independiente, los cables de baja tensión se ven más afectados que los de media tensión, ya que la mayor parte del calor tiende a ascender hacia la superficie.

Cables de MT en salida de SET

La figura 16 muestra la situación en la que los cables de media tensión (MT) se agrupan en la salida de la subestación (SET). En este caso, el cable central es el que recibe el calor de los cables adyacentes. Cuando el cable central alcanza su temperatura de operación nominal, se toma la capacidad de la terna central y se define la capacidad del agrupamiento.

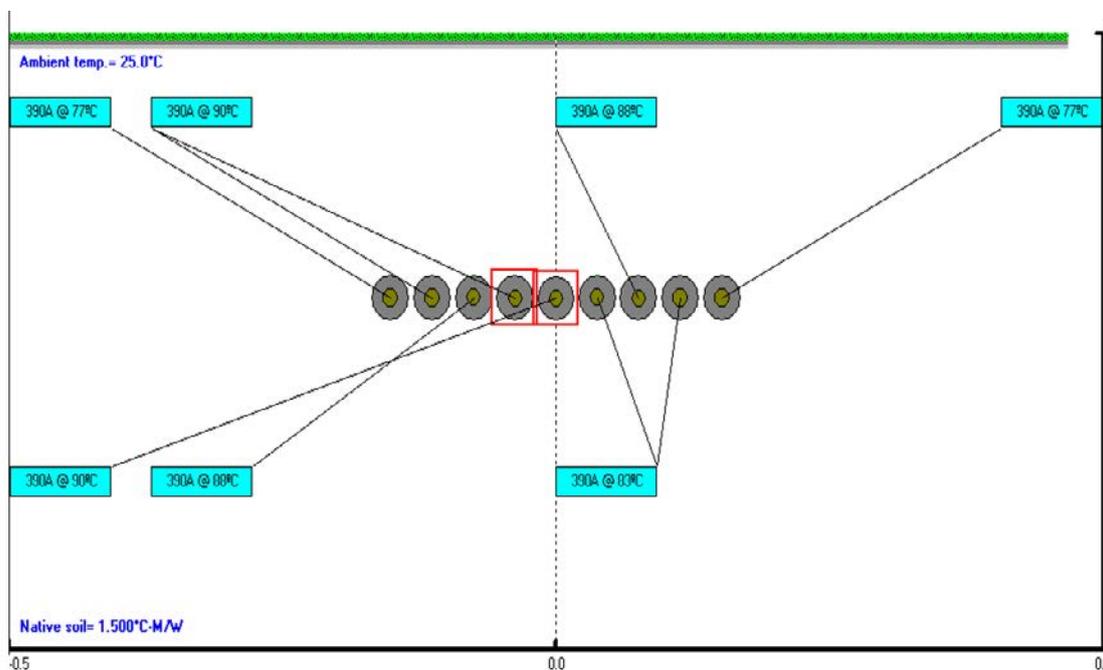


Figura 16. Cables en agrupamiento en salida de SET

Fuente: Elaboración propia.

A medida que se agregan ternas al agrupamiento, la capacidad se redefine utilizando el término «factor de agrupamiento». La tabla 9 muestra cómo este factor varía a medida que aumenta el número de ternas. (Es importante señalar que estos resultados son referenciales).

Tabla 9
Factor de agrupamiento de cables en MT

Ternas	Factor
4	0,838
5	0,805
6	0,780
7	0,763
8	0,749
9	0,739
10	0,730
11	0,723
12	0,718
13	0,713
14	0,708

Fuente: Elaboración propia.

El factor de agrupamiento disminuye a medida que se agregan más ternas. Sin embargo, se observa que este decrece de manera menos significativa cuando se superan las 10 ternas. Se recomienda emplear más de 15 ternas en la salida de subestaciones, ya que la contribución de calor de los cables de los extremos sobre el cable central se reduce considerablemente a partir de ese punto.

REFERENCIAS

- [1] Anders, G. (2005). *Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*. Wiley-IEEE Press.
- [2] Bates, C., Malmedal, K. & Cain, D. (2015). Cable ampacity calculations: A comparison of methods. *IEEE Rural Electric Power Conference*, 81-87. <https://doi.org/10.1109/REPC.2015.13>
- [3] Cardenas, D. (2020). Thermal-conductive model algorithm for the accurate calculation of temperatures in electrical power conductor. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*.
- [4] Exizidis, L., Chatziathanasiou, V. & Henny, B. (2014). Thermal analysis of underground cable crossings at various crossing angles. *9th Mediterranean Conference on Power*

Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, marzo.

- [5] Gouda, O., El Dein, A. & Amer, G. (2011). Effect of the formation of the dry zone around underground power cables on their ratings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(2), 972-978. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2060369>
- [6] Hechavarría, R., et al. (2017). Cálculo numérico de las propiedades térmicas efectivas de un compuesto por elementos finitos. *Ingenius*, (18), 14-20.
- [7] IEC 60287 (2022). *Electric cables - Calculation of the current rating*.
- [8] IEC 60853 (2002). *Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables*.
- [9] Jaramillo-Vacio, R. (2018). Determinación de capacidad de conducción en líneas subterráneas: Estudio de sensibilidad paramétrica. *IEEE - RVP Al Reunión de Verano de Potencia*, julio.
- [10] Karahan, M., Varol, H. & Kalenderli, O. (2009). Thermal analysis of power cables using finite element method and current carrying capacity evaluation. *International Journal of Engineering Education*, 1158-1165.
- [11] Maderey, L. & Jiménez, A. (2005). *Principio de hidrogeografía, estudios del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de México. www.diplomado-sig.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/
- [12] Madrigal, M. (2003). *Análisis armónico en sistemas de potencia*. México: Instituto tecnológico de Morelia.
- [13] Newton, G. (2000). Understanding the Neher-McGrath calculation and the ampacity of conductors.
- [14] Puy, A. (2005). *Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad*. Universidad Politécnica de Catalunya. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3282/5/53973-5.pdf>
- [15] Rasoulpoor, M., Mirzaie, M. & Mirimani, S. M. (2016). Electrical and thermal analysis of single conductor power cable considering the lead sheath effect based on finite element method. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 12(1).
- [16] Rerak, M. & Oclo'n, P. (2017). The effect of soil and cable backfill thermal conductivity on the temperature distribution in underground cable system. *4th Scientific and Technical Conference on Modern Technologies and Energy System*, 13, February.
- [17] Rubio, C. (2016). La relación entre resistividad térmica, humedad y un suelo arenoso pedregoso. *Spanish Journal of Soil Science: SJSS*, 6(2), 123-132.

- [18] Wang, P. et al. (2019). Dynamic thermal analysis of high-voltage power cable insulation for cable dynamic thermal rating. *IEEE Access*, 7, 56095-56106. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2913704>

ACERCA DEL AUTOR

D.SC. OSCAR JULIAN PEÑA HUARINGA

Doctor en Ciencias con Mención en Energética por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Máster en Gestión de las Energías Renovables por la Universidad de Barcelona (Uniba). Maestro en Ciencias con Mención en Sistemas de Potencia, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Ingeniero electricista por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Docente en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa (UNSA), del diploma de Especialización en Protección de Sistemas Eléctricos de ESAN y del programa de premaestría en Sistemas de Potencia de la Universidad Nacional de Ingeniería. Actualmente es gerente de la empresa Power & Technology Systems (PTSYS).

@ oscar.pena.h@uni.edu.pe

@ oscar@ptsys.com.pe

D.SC. WALTER FRANCISCO ESTRADA LOPEZ

Doctor en Ciencias con especialidad en Física por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Profesor principal con actividad docente e investigador en la Universidad Nacional de Ingeniería. M.Sc. Ciencias con especialidad en Ciencias de los Materiales por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Especialista e investigador en estructura de materiales y microscopía electrónica.

@ westrada@uni.edu.pe

Recibido: 15-02-24

Revisado: 18-07-24

Aceptado: 27-07-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.