

Cargabilidad de Cables Subterráneos en Redes Eléctricas de Media Tensión y Propuestas para Incrementar la Ampacidad

D.Sc. Ing. Oscar Julian Peña Huaranga
Universidad de Ingeniería FIEE-UNI

openah@uni.edu.pe; openah@unsa.edu.pe; opena@esan.edu.pe; oscar@ptsys.com.pe

Citar: J. PAIME, 2025, 3, 56-64

14 junio de 2025

Resumen— Este artículo explica cuáles son 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, el modelamiento y simulación en el software Cymcap y los resultados obtenidos por un software alternativo creado en Visual Studio y programado en Visual Basic.

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 algunas alternativas para la incrementar la ampacidad basado en los resultados de la simulación.

Temas o palabras clave— ampacidad, cables de media tensión, redes subterráneas.

I INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución eléctrica de media tensión están compuestas por alimentadores, los cuales pueden ser cable o conductores, los cables pueden ser aéreos o subterráneos. Dependiendo de la geografía en las ciudades se emplean en su mayoría cables subterráneos. La ampacidad se refiere a la máxima corriente que un conductor puede transportar sin sobrecalentarse. Y la cargabilidad hace referencia a la variación de la ampacidad evaluada en el tiempo. Determinar la ampacidad de un cable de media tensión en operación es de vital importancia para los ingenieros de planeamiento, proyectos y operaciones. En este artículo se presenta un análisis de los factores que determinan la cargabilidad de los cables subterráneos. Entre los factores más representativos tenemos: la profundidad de instalación, resistividad térmica del terreno, temperatura de ambiente, temperatura de operación nominal del conductor y el factor de carga.

En su mayoría las empresas de distribución eléctrica tienen información acerca del amperaje que pasa a través de los alimentadores, estos valores son comparados con las capacidades normadas y de esta manera se evalúa el factor de utilización de las redes y la sobrecarga. Sin embargo, las capacidades normadas se dan para las condiciones más críticas de funcionamiento de la red, en ese sentido es necesario realizar la evaluación de la cargabilidad de los cables, debido a su importancia para el diseño, mantenimiento y asignación de las cargas en los alimentadores. Además, tener bien definidas las capacidades de los cables contribuye al aprovechamiento óptimo de las instalaciones existentes y al planeamiento adecuado de las inversiones a realizarse.

En este artículo se toman los tipos de cables, las condiciones de cargabilidad de una empresa de distribución. Los tipos de cables analizados son los N2XSY, estos son unipolares con aislamiento XLPE instalados en 10kV y 22,9kV.

Se calculan las capacidades en base a los estándares IEC 287 "Cálculo de intensidad admisible" [1] e IEC 853 "Cálculo de las capacidades de transporte de los cables para regímenes de carga cíclicos y sobrecarga de emergencia" [2].

En [3] se hace hincapié en que los cálculos de la IEC consideran resistencia interna como si fuera una constante y que la resistencia térmica de las diferentes capas del conductor no se ven afectadas por el incremento de la corriente. En [4] se propone un método con elementos finitos que da resultados más precisos de la evolución térmica cuando se incrementa el amperaje que pasa por el cable. En [5] se analiza cómo influye la cubierta metálica en la ampacidad de los cables de potencia. En [6] se da una visión integral de como la ampacidad del conductor se puede ver afectada por condiciones externas al conductor y toma en consideración mediciones de laboratorio de la resistividad térmica del terreno. En [7] se describe el impacto de la conductividad térmica del terreno en los cálculos de ampacidad, introduciendo la idea de modificar las características del backfill para aumentar la conductividad térmica y sugiere hacer un análisis costo beneficio.

En [8] se analiza la influencia en algunos tramos de conductores de BT enterrados a menor profundidad, da una idea del impacto de instalaciones donde existe paralelismo e invita a evaluar distintos escenarios en las condiciones de instalación de los cables de potencia.

En [9] y [10] se hace énfasis en las ventajas de realizar los cálculos asociados a la ampacidad empleando el método de elementos finitos. En [11] se comparan los métodos de cálculo de ampacidad.

El software Cymcap que emplea elementos finitos para mejorar la precisión de los cálculos.

Se desarrolla un software alternativo en Visual Studio y programado en Visual Basic.

Luego se realiza un análisis comparativo entre los cálculos realizados, explicando los resultados.

Finalmente se proponen alternativas para incrementar la capacidad.

II FACTORES QUE DETERMINAN LA CARGABILIDAD DE LOS CABLES

Existen diversos factores que determinan la cargabilidad de cables, pero podemos agruparlos en las características del terreno, características del cable, características de la instalación y características 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.

A1. Resistividad Térmica

La resistividad térmica es un indicador de la oposición a la propagación del calor y se calcula mediante la siguiente expresión [2]:

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

Donde:

δ : Difusividad térmica (m^2/s)

d : Masa volumétrica en seco (kg/m^3)

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

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

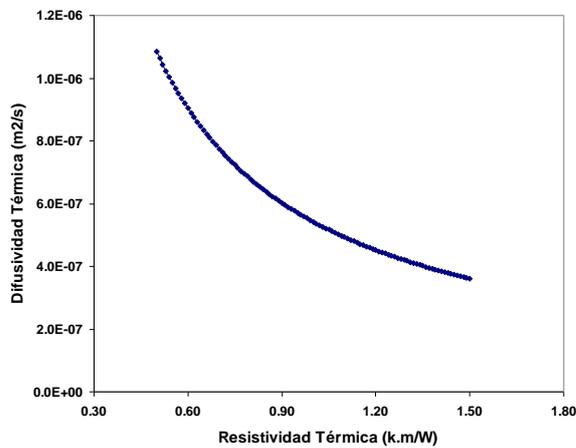


Fig. 1. Difusividad vs. Resistividad

Se sugiere utilizar un valor de difusividad térmica de $0,5 \times 10^{-6} m^2/s$ cuando no se conoce el terreno [2], lo cual nos da una resistividad térmica aproximada de $1K.m/W$. Para realizar un cálculo conservador podemos considerar una resistividad de $1,2K.m/W$.

La disminución de la resistividad térmica favorece la cargabilidad del cable.

En [12] se estudia la composición y naturaleza del suelo en su relación con las plantas y el entorno que le rodea, los elementos gruesos que se pueden encontrar y su relación con la variación de la resistividad térmica del terreno.

En [13] se analiza el efecto de la formación de la zona seca alrededor de los cables eléctricos subterráneos, considerándolo como un factor limitante para la capacidad de conducción.

A2. Humedad

El suelo, desde el punto de vista hidrológico, es un depósito o almacén de agua cuya capacidad para retenerla y contenerla depende de sus propiedades físicas.

La Fig.2 muestra la clasificación de los suelos desde el punto de vista hidrológico.

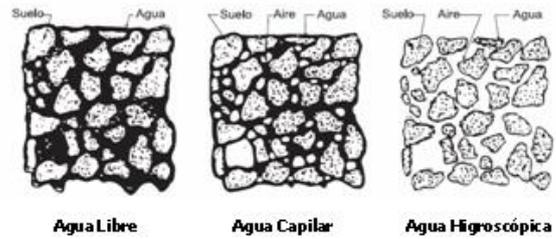


Fig. 2. Humedad del suelo [14]

La naturaleza cohesiva se debe al agua absorbida que rodea las partículas del suelo.

Atterberg propone el esquema mostrado en la Fig. 3 y desarrolla un método que usa diferentes grados de contenido de humedad. Para muy bajo contenido de humedad, el suelo se comporta como un sólido. Para altos contenidos el suelo y el agua pueden fluir como un líquido.

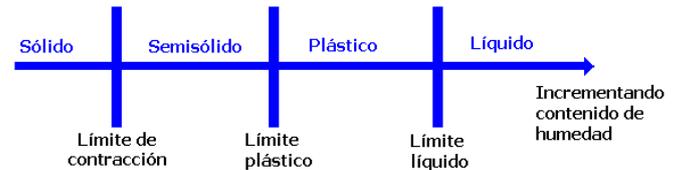


Fig. 3. Límite de Atterberg [15]

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

A3. Consistencia

Es el arreglo geométrico de las partículas de suelo una con respecto de la otra. Factores que la afectan: la forma, el tamaño y la mineralogía de las partículas. También afecta la naturaleza y composición del agua. En la Fig.4 se muestran algunos arreglos.

a. Estructuras en Suelos Granulares

En la estructura de grano individual, las partículas de suelo están en posición estable. Cada partícula está en contacto con las de su alrededor. La forma y distribución de tamaño de las partículas influyen en la densidad.

b. Estructura Panaloide

Estructura de celdas, las arenas finas y limos forman pequeños arcos con cadenas de partículas. Tienen grandes relaciones de vacíos y pueden soportar cargas estáticas normales. Bajo cargas pesadas o bajo un choque de cargas, la estructura se rompe, resultando en asentamientos grandes, es una estructura colapsable.

c. Estructura en Suelos Cohesivos

Existen muchos tipos de estructuras en suelos cohesivos, entre las principales tenemos:

- **Estructura Dispersa**
Las partículas individuales pueden asentarse muy lentamente, sufriendo un movimiento Browniano (en zigzag).
- **Estructura Floculante**
Si las partículas tienden a ordenarse en flóculos visibles. El contacto interparticular es cara-borde con grandes vacíos. Por ello es colapsable. Las uniones son electrostáticas
- **Estructura Floculante Tipo Sal**
Poseen un peso ligero y también poseen una relación de vacíos alto. Su estructura es colapsable al lavarse la sal con agua dulce

d. Textura del Suelo

La variedad de los suelos está dada por las combinaciones de los tipos mostrados en la **Tabla I**

TABLA I
TEXTURA DEL SUELO

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

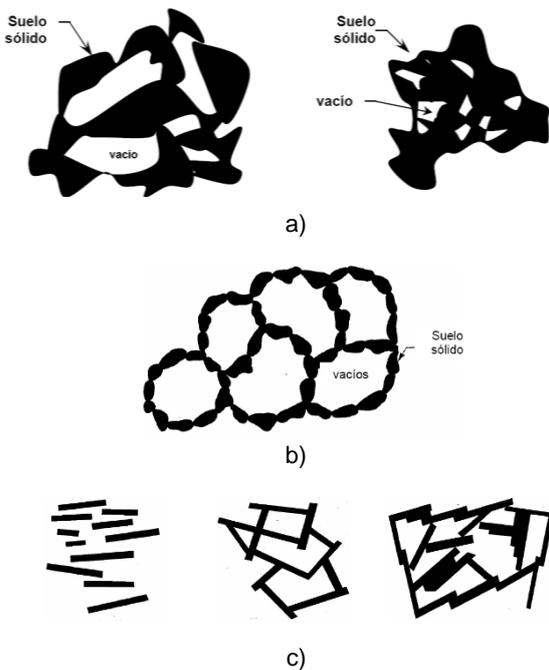


Fig. 4. Consistencia de los Suelos a) Estructuras de Suelos granulares. b) Estructura Panaloide. c) Estructura de Suelos Cohesivos.

El incremento de la compactación no favorece la cargabilidad.

A4. Composición

Los suelos son sistemas compuestos básicamente por tres componentes, sólido, líquido y aire.

La **Fig. 5** muestra las proporciones que se utilizan para tener indicadores acerca de la composición del suelo.

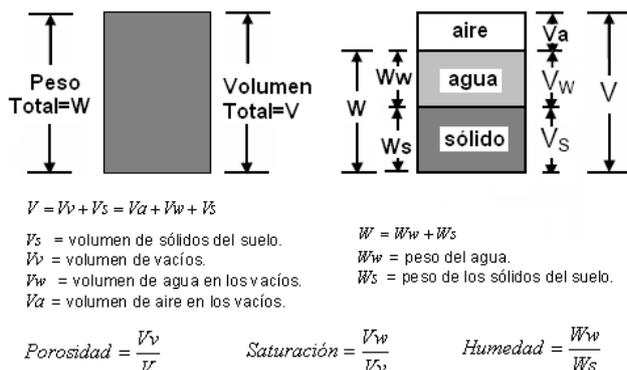


Fig. 5. Composición del Suelo [15]

B. Características del Cable

B1. Aspectos Constructivos

a. Capas

Un cable como mínimo cuenta con tres componentes el conductor, el aislamiento y la cubierta. En algún caso puede tener más de estas tres capas, donde se adiciona semiconductores sobre el conductor y el aislamiento, pantallas metálicas, recubrimientos entre otros. Sea cual fuere la finalidad de utilización del cable, es importante dimensionar adecuadamente cada capa que lo compone y su espesor.

b. Aislamiento

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

c. Proceso de Fabricación

El proceso de fabricación de los cables ha ido evolucionando en el tiempo, al inicio la fabricación era más artesanal, lo cual tenía desventajas como por ejemplo la contaminación; en una misma zona de la fábrica se fabricaban distintos tipos de cables, en el ambiente las partículas del aislamiento utilizado para un cable se mezclaban con el aislamiento de otro produciéndose reacciones químicas trayendo como consecuencia que la capacidad resultante sea mayor o menor a la especificada en condiciones normales.

Como no se tenían instrumentos de precisión, los espesores de las capas tenían un error porcentual hasta del 8% lo cual no era tan perceptible en los cables, este error normalmente era por exceso. La irregularidad de los espesores hacía que las capas no se compacten entre ellas, esto originaba vacíos. Los cuales modificaban la capacidad del cable y su duración. Luego con la aparición de las maquinas extrusoras y la optimización de los procesos esto fue superado.

d. Materiales

En el proceso de fabricación es importante el valor de la resistencia a 20°C en corriente continua. Ya que esta define el valor de las pérdidas y el grado de calor que disipa el conductor para un determinado amperaje. Esto al margen del incremento de la resistencia en función de la temperatura dado por:

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

Existe un recubrimiento metálico que en algunos casos se coloca sobre el conductor, su espesor es inferior a 0.1mm, incrementa la resistencia del conductor entre 0.51% y 2.82% (dependiendo de la sección), sirve para protección frente a la corrosión y reduce los efectos del campo magnético generado por el paso de la corriente.

B2. Aspectos Térmicos

La transferencia de calor sigue una ley fundamental en la física y el calor siempre fluye del objeto más caliente al objeto más frío. La tasa de transferencia de calor depende de varias variables y se puede describir mediante una ecuación térmica que se asemeja Ley de Ohm, donde la tensión es reemplazada 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. [16]

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

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:

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

Las capas de un cable constituyen diferentes superficies térmicas, por lo cual podemos representar al cable como un circuito térmico equivalente.

Para comprender mejor la capacidad de corriente tenemos que examinar cómo se transfiere el calor y los circuitos termales que se forman en un conductor que transporta corriente.

En la Fig. 6 T1, T2, T3 y T4 son resistividades térmicas; siendo T4 la de mayor magnitud

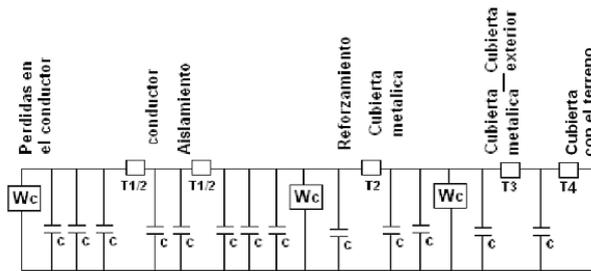


Fig. 6. Circuito Térmico Equivalente [17]

C. Características de la Instalación

C1. Profundidad

La profundidad de la instalación de los cables incide directamente sobre la capacidad de los cables a mayor profundidad, menor capacidad.

Cabe mencionar que en algunos casos la profundidad de instalación depende de otros factores como, distancias mínimas de seguridad de la instalación, cruces, sistemas con cables telefónicos por la misma vía y disposiciones municipales o jurisdiccionales.

C2. Temperatura de Ambiente

A mayor temperatura de ambiente, menor capacidad. Se considera adicionalmente la temperatura del suelo para determinar la capacidad.

C3. Materiales de Relleno de la Zanja

Los materiales de relleno de la zanja, su compactación en la instalación y su resistividad térmica inciden directamente sobre la capacidad del cable.

Antes de realizar la instalación de los cables el terreno presenta un valor de resistividad. Al instalar los cables la

porción de tierra retirada es cernida, se coloca en la zanja y se compacta. Por lo que en el terreno se tendrá un equivalente de las dos resistividades térmicas, la original y la de la porción retirada tal como lo muestra la Fig. 7. La resistividad térmica que tendrá mayor influencia será R_1 .

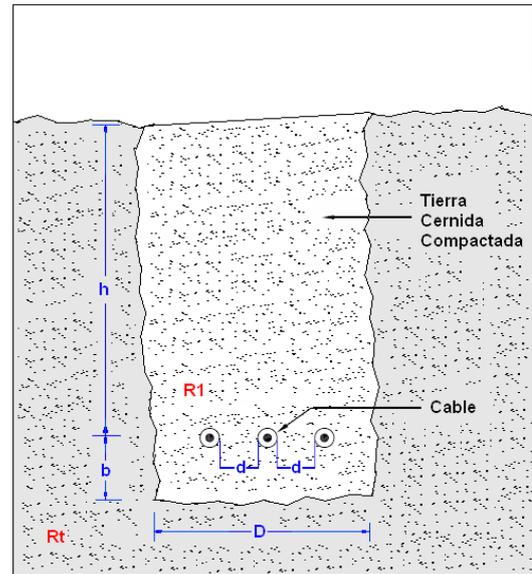


Fig. 7. Características de la Instalación

D. Características de la demanda

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

D1. Diagrama de Carga

La potencia disipada por el cable depende de la corriente, el paso de la corriente incrementa la temperatura. Como la demanda es variable en el día, el cable opera a distintas temperaturas.

En [2] se indica que al final de un periodo de 6horas continuas se produce la máxima temperatura en el cable,

Cabe mencionar que no necesariamente la máxima temperatura que alcanza el cable es coincidente con la máxima demanda. Desde este punto de vista el cable puede ser sometido a diagramas de carga que presenten algunos picos de corriente, siempre y cuando estos no originen que el cable supere su temperatura de operación nominal.

Un indicador que nos ayuda a evaluar la cargabilidad es el factor de carga, definido como:

$$FC = \frac{Ip}{Im} \quad (5)$$

Donde:

FC : Factor de carga.

Ip : Corriente promedio.

Im : Corriente máxima.

Cuando un diagrama de carga es plano el factor de carga se acerca a 100% y el incremento de temperatura es continuo. Los fabricantes de cables en sus tablas nos dan la capacidad a factor de carga 100%.

En un comportamiento real del factor de carga es diferente de 100%, por lo que el cable puede soportar mayor amperaje que el especificado por el fabricante, conociendo el factor de carga podemos encontrar la máxima demanda admisible por el cable sin perjudicar su tiempo de vida. La Fig.8 explica de manera gráfica estos conceptos.

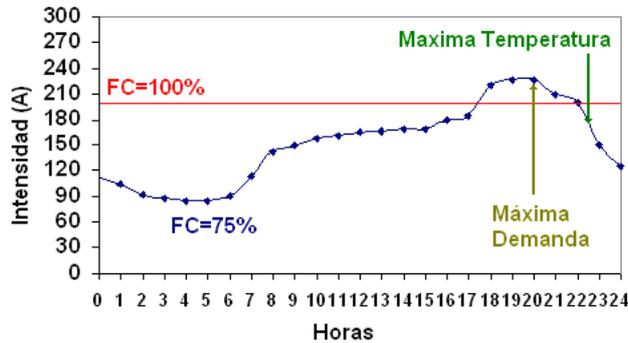


Fig. 8. Comportamiento de la carga

Los cables en sus especificaciones presentan un porcentaje de sobrecarga que pueden soportar por una cantidad de horas en todo su tiempo de vida, la indicación que dan es el porcentaje y cuantas horas continuas al día se puede dar esta sobrecarga. En estas condiciones el cable trabaja a la temperatura de emergencia.

D2. Tipo de Carga

Existen dos tipos de carga bien diferenciados, las cargas lineales y no lineales, las no lineales tienen componentes armónicos que incrementan la corriente y por ende la temperatura del conductor y las pérdidas. Un análisis del incremento de las pérdidas en cables por el paso de armónicos es mostrado en [18].

III CÁLCULO DE CARGABILIDAD DE LOS CABLES N2XSY

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de la capacidad de los cables N2XSY, de acuerdo con su geometría, las normas aplicables y la simulación en el software Cymcap.

A. Geometría del Cable

La Fig. 9 muestra la geometría de los cables N2XSY, con las resistencias térmicas aplicables para el cálculo de su capacidad. También se muestra el cálculo del diámetro del cable.

B. Datos para el cálculo

B1. Datos de instalación

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

B2. 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 V**

TABLA V
DIMENSIONES DE LOS CABLES N2XSY

Sección (mm ²)	φ conductor (mm)	Espesor del aislamiento (mm)	φ Sobre el aislamiento o (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

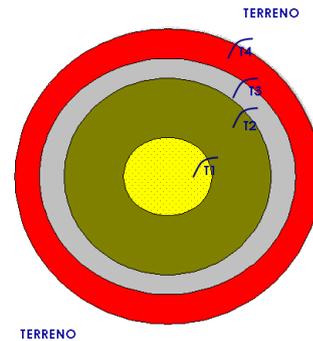


Fig. 9. Geometría del Cable N2XSY

C. Resultados comparativos para factor de carga 100%

La **Tabla VI** muestra las capacidades normadas para estos cables.

TABLA VI

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

D. Resultados comparativos para factor de carga 75%

La **Tabla VII** muestra los resultados del cálculo para FC=0,75.

TABLA VII

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

Los resultados muestran que los valores calculados a factor de carga 100% son muy próximos entre sí. Las principales diferencias radican en los valores a factor de carga 75%. La **Fig. 10** muestra la variación de las capacidades con el incremento de la sección del cable, se observa que hay mayor diferencia en el cálculo en base a la norma IEC a medida que se incrementa la sección.

El cálculo realizado en el software Cymcap tiene mayor precisión por que emplea elementos finitos. En esta configuración (tres cables unipolares) cada uno de ellos es una fuente de calor, cuando el conductor del centro alcanza la temperatura de operación nominal se define la capacidad de corriente que es capaz de transmitir la terna.

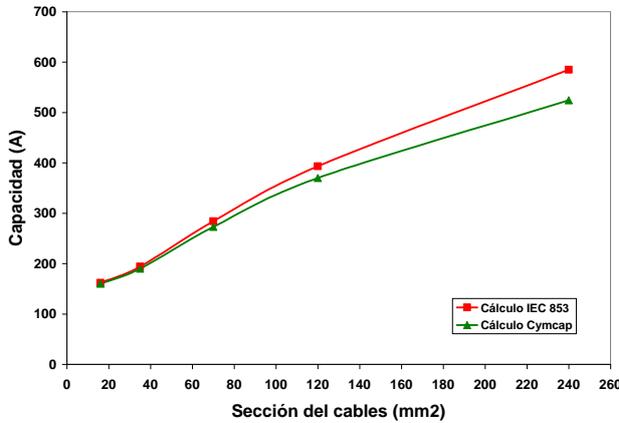


Fig. 10. Variación de las capacidades Calculadas Para Factor de Carga 75%

IV SOFTWARE ALTERNATIVO

Para la creación de un software alternativo es necesario cumplir con las etapas de planificación, análisis, diseño y programación.

A. Planificación

En esta etapa se establece los objetivos, el alcance y la definición de los recursos que se asignarán para la elaboración del software. En ese sentido se han evaluado varias herramientas, en base a la complejidad del cálculo, velocidad de procesamiento de la información, tiempo de aprendizaje, afinidad con los lenguajes de programación y costos asociados a licencia de plataformas nativas.

B. Análisis

En esta etapa se analiza todo lo que se espera del software. Por ello, se hace una búsqueda exhaustiva para llegar a una comprensión precisa de los requerimientos o características que debe poseer el programa. Al tratarse de cables de media tensión, lo que se espera es que nos dé el resultado de la ampacidad a régimen permanente y la ampacidad en condición de carga cíclica, considerando un factor de carga variable que las compañías de distribución eléctrica y sector minero tienen en los sistemas SCADA, (como información histórica).

C. Diseño

Se considera que el software debe tener un entorno amigable, Una interfaz gráfica que permita visualizar e ingresar los datos de entrada. Así como tener ventanas emergentes con los datos de salida. Se muestra resultados parciales, solo a medida de información, pero poniendo mayor énfasis en los resultados a plena carga y condición de carga cíclica. El diseño debe ser intuitivo, para los ingenieros que trabajan en ingeniería, planeamiento, operación y mantenimiento.

Para el desarrollo del diseño se empleó el Software Visual Studio [19]. Considerado el mejor IDE completo para desarrolladores de .NET y C++ en Windows. Completamente equipado con una buena matriz de herramientas y características para elevar y mejorar todas

las etapas del desarrollo de software.

La Fig. 11 muestra el entorno gráfico. Donde se puede apreciar que aparece un cable en representación de la terna que es instalada en media tensión.

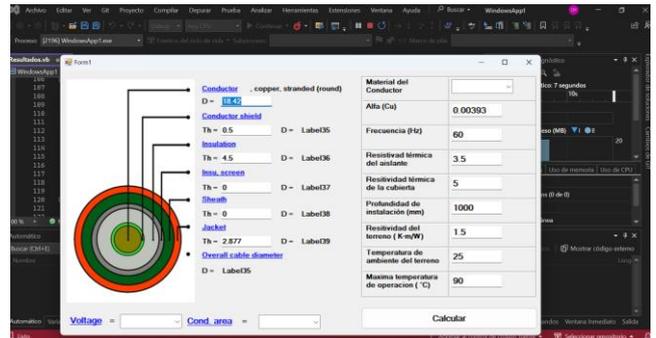


Fig. 11. Entorno gráfico

D. Programación

Al emplear el programa Visual Studio, este puede soportar varios lenguajes de programación, como son: C#, C++, F#, JavaScript, Python, TypeScript, Visual Basic y XAML. Por mayor afinidad y conocimiento se ha seleccionado trabajar con Visual Basic. La Fig. 12 muestra el entorno de programación.

Aquí es donde se agregó toda la formulación matemática para régimen permanente [1] completa y la formulación matemática para régimen de carga cíclico [2] para el caso asociado a conocer el factor de carga del alimentador, debido a que es el que más se presenta en los sistemas de distribución eléctrica. En la programación se ha incluido la posibilidad de recalcular cambiando el factor de carga sin la necesidad de volver a compilar todo el programa, sino como recalcular de resultado de corriente en una ventana específica. Esto es algo muy útil para evaluar las condiciones actuales y posibilidad futura de sobre cargar de la red. Tal como se muestra en la Fig. 13.

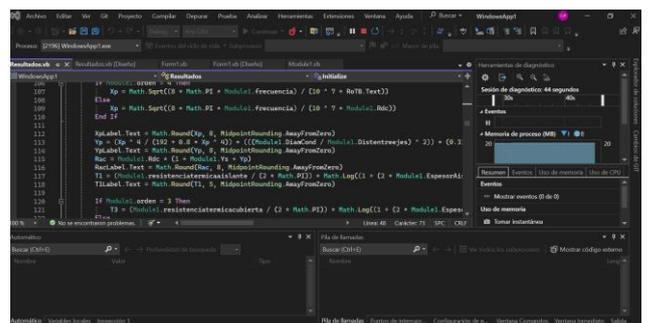


Fig. 12. Entorno de programación

Factor	0.00324
E	5.15912
B(6)	0.49207
u (FC)	0.75
k	2.45037
M	1.20486
FC=0.75 CALCULO	160.77448
norma empresa	150
Variacion (%)	7.18

Fig. 13. Resultado a factor de carga 0.75

Se realizó la comparación de resultados respecto a lo calculado empleando el software CYMCAP [20]

La **Tabla VIII** muestra la comparación de los resultados para las secciones de cables empleadas en 10kV del tipo N2XSY.

TABLA VIII
CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS DE AMPACIDAD OBTENIDOS POR EL SOFTWARE PROPIETARIO Y EL SOFTWARE CYMCAP

Régimen Permanente (FC 100%)	Software alternativo	CYMCAP	Error (%)
25mm ²	133.44	139.10	-4.07%
35mm ²	159.03	165.30	-3.79%
50mm ²	187.37	193.60	-3.22%
70mm ²	237.86	235.00	1.22%
120mm ²	320.07	314.00	1.93%
240mm ²	463.32	443.00	4.59%
Régimen Cíclico (FC 75%)	Software alternativo	CYMCAP	Error (%)
25mm ²	160.77	166.03	-3.17%
35mm ²	192.59	198.04	-2.75%
50mm ²	228.18	233.07	-2.09%
70mm ²	290.44	284.01	2.26%
120mm ²	395.82	384.04	3.07%
240mm ²	583.45	544.02	7.25%

V PROPUESTAS PARA EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE LOS CABLES N2XSY

A. Modificación de la posición del cable central

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

TABLA IX
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 separados 5cm	359
Cables separados 7cm (Actual)	364
Cables separados 10cm	369
Cables separados 15 cm	375
Cables separados 20 cm	380
Cable central (profundidad 95cm)	381
Cable central (profundidad 90 cm)	391

Esto nos indica que levantar el cable central 5 cm es equivalente a separar 20 cm los cables entre sí. Si levantamos el cable central 10 cm la ganancia es mayor.

Podría evaluarse la colocación de un ladrillo que sirva de soporte al cable central de tal manera que la instalación sea estable. Este componente puede colocarse cada cierta distancia del tendido del cable subterráneo, disminuyendo los costos de instalación.

En la posición horizontal el cable central recibe el calor producido por los cables adyacentes de manera directa, al levantar el cable central el centro de calor se desplaza a un punto que no incide directamente sobre alguno de los cables.

La **Fig. 14** muestra la configuración actual y la

propuesta.

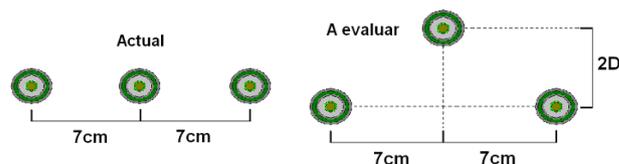


Fig. 14. Configuración Actual y Propuesta

B. Cables en condición de agrupamiento en salida de SET

La **Fig. 15** muestra la condición en que los cables de MT se encuentran agrupados en la salida de SET. En este caso el cable central es el que recibe las contribuciones de calor de los cables adyacentes, cuando el cable central alcanza la temperatura de operación nominal, se toma la capacidad de la terna central y se define la capacidad del agrupamiento.

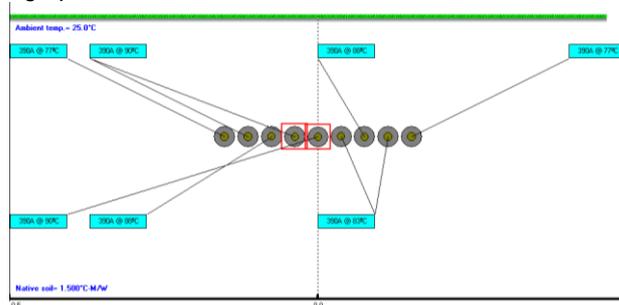


Fig. 15. Cables en agrupamiento en salida de SET.

Cuando se van agregando ternas al agrupamiento se va redefiniendo la capacidad, para ello se utiliza el término "Factor de agrupamiento" La **Tabla X** muestra el factor de agrupamiento conforme se incrementa la cantidad de ternas. (Es necesario aclarar que estos resultados son referenciales).

TABLA X
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

El factor de agrupamiento disminuye a medida que se agregan más ternas, se puede observar que el factor de agrupamiento decrece en menor medida cuando se van agregando más de 10 ternas, esto se debe a que la contribución de calor de los cables de los extremos sobre el cable central se hace cada vez más pequeña.

VI CONCLUSIONES

En este artículo podemos destacar las siguientes conclusiones:

- El análisis de la cargabilidad de 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 que lo rodea, las características de su instalación y la demanda.
- El terreno donde son instalados los cables juega un papel relevante en la determinación de la capacidad. A mayor resistividad térmica, menor capacidad.
- Respecto a las características del cable los factores que más influyen en la capacidad son la resistencia DC del conductor a 20°C y las pérdidas dieléctricas, mas no así la precisión en los espesores de las capas del cable para cada sección analizada.
- Respecto a la instalación de los cables podemos afirmar que estos pierden capacidad a medida que son instalados a mayor profundidad.
- Los valores calculados con el software Cymcap son más precisos por la utilización del método de elementos finitos.
- Respecto a la configuración propuesta para los cables N2XSJY levantar el cable central 5 cm es equivalente a separar 20 cm los cables entre sí. Incrementando la capacidad de conducción de la terna en 4.67%.
- El factor de agrupamiento disminuye a medida que se agregan más ternas, se recomienda emplear más de 15 ternas en salida de subestaciones. debido a que la contribución de calor de los cables de los extremos sobre el cable central se hace cada vez más pequeña.
- Los resultados de amperaje obtenidos con el software alternativo (programado en Visual Basic, compilado y graficado en Visual Studio) tienen un error porcentual aceptable (<4%) tomando como referencia los valores obtenidos bajo las mismas consideraciones de diseño que nos da el software CYMCAP, tanto para régimen de carga permanente y régimen de carga cíclico.

APÉNDICE A: EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DEL CABLE 240N2XSJY

A. Calculo Según Normas IEC

A1. Calculo 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).

W_d: 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)

λ_1 : 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 $\Delta\theta$: $\Delta\theta = 90 - 25 = 65^\circ C$

Cálculo de *W_d*: *W_d* = 0

Cálculo de *R*: *r* = 0,000098533Ω/m

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

T₁ = 0.21600 K.m/W

T₂ = 0 K.m/W

T₃ = 0.09373 K.m/W

T₄ = 2.81773 K.m/W

Reemplazando valores en la ecuación 6 con *n* = 1, λ_1 = 0 , λ_2 = 0, tenemos:

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

I = 459 A

A2. Calculo a FC 75%(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 sólo 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 (7)” [2]

$$M = \frac{1}{(1 - k(1 - \mu)[1 - \beta(6)])^{0,5}} \quad (7)$$

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.

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 240mm² N2XSJY, 10kV es:

$$I = 1,274 \times 459$$

$I = 585$

B. Calculo con el Software Cymcap

La Fig. 16 muestra los resultados de la simulación para el cable 240N2XSJ.

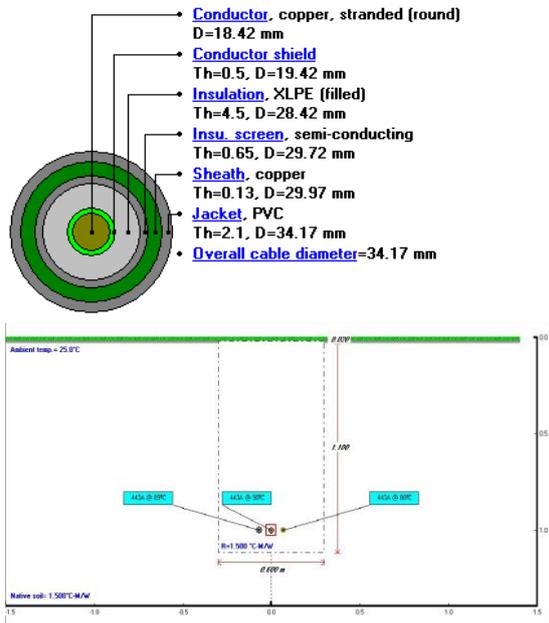


Fig. 16. Simulación del cable 240 N2XSJ

REFERENCIAS

[1] IEC 60287-1-2:2023 Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-2: Current rating equations (100 % load factor) and calculations of losses - Sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation.

[2] IEC 60853-3:2002 Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables - Part 3: Cyclic rating factor for cables of all voltages, with partial drying of the soil.

[3] D. Cardenas "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 2020.

[4] P. Wang et al., "Dynamic Thermal Analysis of High-Voltage Power Cable Insulation for Cable Dynamic Thermal Rating," in IEEE Access, vol. 7, pp. 56095-56106, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913704

[5] M. Rasoulpoor, M. Mirzaie S. M. Mirimani "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, Vol. 12, No. 1, March 2016.

[6] Rubén Jaramillo-Vacio "Determinación de capacidad de conducción en líneas subterráneas: Estudio de sensibilidad paramétrica" IEEE - RVP AI Reunión de Verano de Potencia July 2018.

[7] Monika Rerak, Paweł Ocloń "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 Vol. 13 Feb. 2017.

[8] L. Exizidis, V. Chatziathanasiou, B. Henny "Thermal analysis of underground cable crossings at various crossing angles" 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion March 2014.

[9] Murat Karahan, H Selcuk Varol, Ozcan Kalenderli "Thermal Analysis of Power Cables Using Finite Element Method and Current carrying Capacity Evaluation" International Journal of Engineering Education pp. 1158-1165, January 2009.

[10] R. Hechavarría, et al., "Cálculo numérico de las propiedades térmicas efectivas de un compuesto por elementos finitos" Ingenius, no.18 pp. 14-20, Dic 2017.

[11] C. Bates, K. Malmedal and D. Cain, "Cable Ampacity Calculations: A Comparison of Methods," IEEE Rural Electric Power Conference, pp. 81-87, April 2015, doi: 10.1109/REPC.2015.13.

[12] Rubio C. M "La relación entre resistividad térmica, humedad y un suelo arenoso pedregoso" Spanish Journal of Soil Science: SJSS Vol. 6 no. 2, pp. 123 – 132, March 2016.

[13] O. E. Gouda, A. Z. El Dein and G. M. Amer, "Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground Power Cables on Their Ratings," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 2, pp. 972-978, April 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2060369.

[14] L. Maderey, A. Jiménez Principio de hidrogeografía, estudios del ciclo hidrológico, México: Universidad Autónoma de México, 2005. www.diplomado-sig.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/libros/hidrogeografia/

[15] A. Puy Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad, España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2005. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3282/5/53973-5.pdf>

[16] G. Newton, "Understanding the Neher-McGrath Calculation and the Ampacity of Conductors" January 2000.

[17] G. Anders, Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment. New Jersey, EEUU: Wiley-IEEE Press, 2005.

[18] M. Madrigal, Análisis armónico en Sistemas de Potencia, México: Instituto tecnológico de Morelia, 2003.

[19] Microsoft. (17 de 12 de 2023). Microsoft Visual Studio. Obtenido de <https://visualstudio.microsoft.com/es/>

[20] CYME - CYMCAP Software versión 8.2 Obtenido de: <https://my.cyme.com/>

BIOGRAFÍA



Oscar Peña Huaringa; Natural de Huarochirí - Lima Perú, Doctor en ciencias con Mención en Energética, por la universidad Nacional de Ingeniería (UNI) – Perú, Maestro en Ciencias con Mención en Sistemas de Potencia por la Universidad de Ingeniería (UNI)- Perú, Master en Ingeniería y Gestión de Energías Renovables por la universidad de Barcelona (UNIBA)- España. Ingeniero Electricista, por la Universidad Nacional de ingeniería (UNI) – Perú.

Su experiencia profesional incluye más de 20 años en el área de Calidad de energía y gestión energética, trabajo en el centro de investigación de la facultad de ingeniería eléctrica y electrónica UNI-FIEE, MANELSA, CAM PERU, LUZ DEL SUR, SCHNEIDER ELECTRIC. Actualmente es gerente general de la empresa PTSYS SAC, que brinda soluciones en calidad de energía y gestión energética y protección eléctrica a los sectores industrial y minero.