

# Implementación de líneas aéreas de media tensión

Evaluación técnica, económica y ambiental de la implementación de líneas aéreas de media tensión 13,2 kV compactas con espaciadores.

Por Cristián Hernán Arce y Martín Rodrigo Verger  
UTN-FRC-EPEC

## Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la conveniencia técnica, económica y ambiental de la utilización de líneas aéreas compactas de media tensión 13,2 kV tipo *hendrix* (con espaciadores) en distribución, en zonas urbanas operadas por la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC). Esta tipología constructiva está poco desarrollada y utilizada en el ámbito de la provincia.

## Introducción

Una solución tecnológica que posibilita a las empresas distribuidoras mejorar el nivel de calidad de la energía distribuida a sus clientes, incrementar la confiabilidad del sistema, reducir el impacto ambiental y disminuir las pérdidas técnicas mediante la implementación de las líneas aéreas compactas con espaciadores.

Durante el desarrollo se analizarán aspectos técnicos, económicos y ambientales de este tipo constructivo de líneas en comparación de otras tipologías ya conocidas como ser aéreas con conductores desnudos y subterráneas con cables aislados, por lo cual se desarrollará:

- » Cálculo de reactancias inductivas a fin de demostrar que la caída de tensión en redes compactas con espaciadores es menor que en las convencionales.
- » Cálculo de momento eléctrico, para determinar que la energía transmitida por redes compactas es superior que en las convencionales.
- » Cálculo de pérdidas técnicas, en donde se observará la disminución de las mismas.

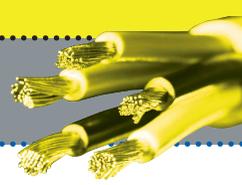
- » Análisis de costos de los distintos sistemas de distribución, mostrando las virtudes de su implementación.
- » Análisis del impacto ambiental provocado por líneas de media tensión, donde se podrá observar la reducción del mismo mediante la implementación del tipo constructivo analizado.

## Desarrollo del trabajo

En redes compactas protegidas se utiliza un conductor de aluminio puro, cuerda circular compacta, provisto de una capa de material semiconductor, otra de polietileno reticulado (XLPE) resistente a la radiación solar, y por último una de polietileno de alta densidad (PEAD) a fin de lograr características contra el encaminamiento de descargas y compatibilidad con los accesorios poliméricos necesarios.

No posee características correspondientes a un cable aislado, es decir, no presenta condiciones de aislación plena, ni confinamiento del campo eléctrico en el dieléctrico del aislante.

Las fases están distanciadas mediante el uso de espaciadores poliméricos, distanciados unos ocho metros, sostenidos por un hilo portante de acero de alta resistencia mecánica que se conoce como portante o fiador dado a que este es el que realiza el esfuerzo de sostener a los conductores de fases y protegerlas contra la caída de ramas y árboles; el mensajero no es aislado y cumple también con la función de hilo de guardia ya que se lo instala por encima de los cables protegidos.



Este sistema permite reducir las distancias entre fases logrando una disminución importante del espacio aéreo ocupado por la línea.

### Ventajas y desventajas

Estas redes presentan importantes ventajas que debemos conocer: a) reducción de costos operativos: menor intervención en la red con reducción de costos de mantenimiento correctivo y preventivo; b) potencia transmitida: este tipo de instalación permite el montaje de hasta cuatro ternas utilizando la misma postación, por lo cual se disminuye la inversión inicial y posibilita una mayor potencia transmitida; c) reducción de la duración media de interrupciones y de la frecuencia media de interrupciones: es posible mejorar la calidad del servicio técnico dado a una reducción de las interrupciones accidentales y cortes programados; d) medioambiente: representan un menor impacto ambiental al reducir considerablemente los espacios de montajes y franjas de seguridad. Se reducen las podas de árboles tanto en frecuencia como en volumen, son de mayor estética y armonizan con el medioambiente; e) seguridad: reduce los riesgos de accidentes eléctricos del personal operativo, dado a una menor intervención del personal; f) reducción de pérdidas técnicas y mejoras en la capacidad de transporte: dado a una reducción de la impedancia en la línea, se obtienen menores pérdidas y un mayor momento eléctrico lo que permite incrementar la potencia transmitida; g) reducción de las franjas de seguridad: dado a la utilización de espaciadores, se disminuye la distancia entre fases, logrando una menor franja de seguridad.

La principal desventaja o inconveniente de este sistema se debe al deterioro de las propiedades aislantes de la capa de polietileno reticulado de alta densidad que poseen los cables protegidos, ya que, en caso de utilizar materiales poliméricos con distintas constantes dieléctricas a las del cable, pueden originarse descargas superficiales en el área de contacto entre ambos materiales, denominadas "encaminamiento eléctrico" o "tracking".

Estas descargas provocan el envejecimiento prematuro de los materiales aislantes empleados en las líneas de distri-

bución compactas, pudiendo llegar a dañar la capa aislante del cable como así también a los espaciadores o aisladores, los cuales pueden llegar a sufrir desprendimiento de fragmentos componentes de los mismos e incluso la caída de los cables, llegando a producir la falla completa de la línea.

Se han realizado estudios para verificar el efecto de compatibilidad de los materiales, es decir, el efecto de posibles diferencias en las constantes dieléctricas de los materiales; sin embargo aun no se logra contrarrestar los efectos negativos que provocan la presencia de altos campos eléctricos generados en la zona de contacto de dos o más materiales que cuentan con constantes dieléctricas distintas, por lo que en la actualidad se emplean accesorios del mismo tipo de material que la aislación del conductor, para asegurar compatibilidad dieléctrica entre los mismos y evitar que aparezcan descargas superficiales que dañen las aislaciones de los materiales.

Por lo expuesto podemos decir que teniendo la precaución de utilizar los materiales adecuados, esto deja de ser una desventaja para pasar a ser un punto importante a tener en cuenta al momento de ejecutar un proyecto de redes compactas con cables protegidos

### Aspectos técnicos

Se efectuarán cálculos de reactancias inductivas, momento eléctrico y pérdidas, para demostrar los beneficios de implementar redes compactas.

### Cálculo de reactancia inductiva

Las configuraciones trifásicas más empleadas son las numeradas a continuación.

1) Línea desnuda con cruceta y/o ménsula. Se calcula en base a una ménsula de 1,80 metros de longitud y conductor de AIAI de 50 mm<sup>2</sup> de sección.

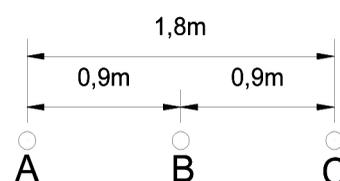


Figura 1. Posición de conductores en línea aérea convencional

$$(1) \text{DMG} = \sqrt[3]{(D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA})} = 1,134 \text{ m}$$

$$(2) r' = 0,758 \cdot D_c / 2 = 3,525 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$(3) L_0 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln(\text{DMG}/r')$$

$$(4) L_0 = 1,155 \cdot 10^{-6} \text{ Hy/m}$$

$$X_{L0} = 2\pi \cdot f \cdot L_0$$

$$X_{L0} = 0,363 \text{ } \Omega/\text{km}$$

2) Línea subterránea con cables unipolares. Se adopta para el cálculo un cable subterráneo de aluminio de 50 mm<sup>2</sup> de sección, aislación XLPE, colocados en plano horizontal y distanciados siete centímetros.

$$(5) X_L = 0,1445 \cdot \log(D_{eq}/r_M)$$

$$X_L = 0,208 \text{ } \Omega/\text{km}$$

3) Línea protegida en disposición compacta. Se adopta para el cálculo un cable protegido de aluminio de 50 mm<sup>2</sup> de sección dispuesto en un espaciador polimérico promedio de 0,19 metros de longitud entre fases.

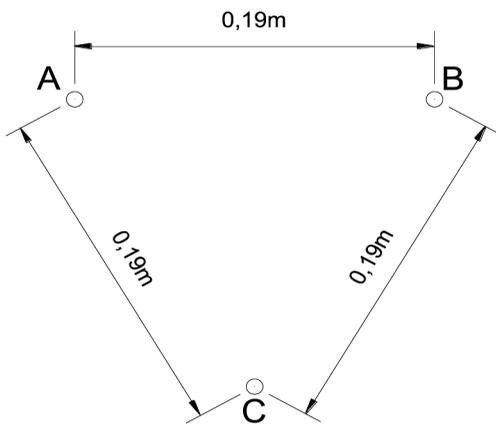


Figura 2. Posición de conductores en línea aérea compacta

$$(6) \text{DMG} = \sqrt[3]{(D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{CA})} = 0,19 \text{ m}$$

$$(7) r' = 0,758 \cdot D_c / 2 = 3,07 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$(8) L_0 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln(\text{DMG}/r')$$

$$(9) L_0 = 0,82 \cdot 10^{-6} \text{ Hy/m}$$

$$X_{L0} = 2\pi \cdot f \cdot L_0$$

$$X_{L0} = 0,259 \text{ } \Omega/\text{km}$$

Resumiendo los resultados obtenidos y efectuando un cálculo de la caída de tensión de los distintos tipos de redes contemplando una longitud de mil metros y una potencia transmitida de 1.000 kVA, tenemos la tabla 1.

Como se puede observar en la tabla la línea compacta posee una menor reactancia inductiva que una línea convencional con conductor desnudo, por lo tanto una menor caída de tensión.

## Cálculos de reactancias capacitivas

La diferencia de potencial entre los conductores de una línea de transporte hace que estos se carguen como las placas de un condensador. La capacidad entre los conductores paralelos es constante, dependiendo de las distancias entre ellos y demás dimensiones.

En una línea trifásica, cada par de conductores forma un condensador de manera que la de tres conductores equivale a un grupo de tres conductores conectados en triángulo.

La capacidad hace que, si la tensión aplicada es alterna, haya una circulación de corriente capacitiva denominada corriente de carga de la línea, que es independiente de la carga conectada en el extremo receptor.

Las ecuaciones para efectuar el cálculo de capacitancia y reactancia capacitiva por fase son:

$$(10) C_n = [0,0241 / \log(\text{Deq}/r)] \text{ } [\mu\text{F}/\text{km}]$$

$$(11) X_{Cn} = [0,132 \cdot \log(\text{Deq}/r)] \text{ } [\text{M}\Omega \cdot \text{km}]$$

Dado a la configuración de las líneas aéreas, las capacidades son muy pequeñas y normalmente se desprecian en líneas de longitud menor a 80 km y en tensiones menores a



Sistema	Resistencia (Ω/km)	Reactancia (Ω/km)	Impedancia (Rcosφ) [Ω/km]	Caída de tensión del tramo [V]	Caída de tensión [%]
Conductor desnudo	0,874	0,363	0,946	71,7	0,54
Subterráneo	0,567	0,208	0,604	45,75	0,35
Línea compacta	0,796	0,259	0,837	63,41	0,48

Tabla 1. Caídas de tensión.

66 kV, por lo cual en el presente análisis, al tratarse de línea de media tensión, cuya longitud generalmente no excede los 20 km, y su tensión es de 13,2 kV, no se tendrán en cuenta las reactivas capacitivas de las mismas.

### Momento eléctrico

Se define como el producto de la longitud de una línea eléctrica desde el origen hasta el punto de suministro por la potencia que demanda el receptor.

$$(12) P_{Rm} \cdot l = (30 \cdot V^2 R \cdot \text{Reg} (\%)) / \sqrt{(R^2 + X^2)}$$

Se exponen los resultados obtenidos del cálculo de momento eléctrico en función de las distintas secciones de conductores comercialmente disponibles.

Dicho cálculo se realizó en base de una tensión en el extremo receptor  $V_R = 13.200 \text{ V}$ , una  $\text{Reg} = 1\%$  y una longitud de  $l = 1 \text{ km}$ .

En la figura 3 se distingue que las redes compactas permiten transmitir mayor potencia que las líneas convencionales con conductores desnudos, pero menor que en cables subterráneos.

Longitud (m)	Pérdidas conductor desnudo (kW)	Pérdida cables protegidos (kW)	Pérdida cables subterráneos (kW)
500	7,61	7,21	7,14
1.000	15,22	14,41	14,28
1.500	22,83	21,62	21,41
2.000	30,44	28,82	28,55
2.500	38,05	36,03	35,69
3.000	45,66	43,24	42,83
3.500	53,27	50,44	49,97
4.000	60,88	57,65	57,1
4.500	68,49	64,86	64,24
5.000	76,10	72,06	71,38

Tabla 2. Pérdidas técnicas.

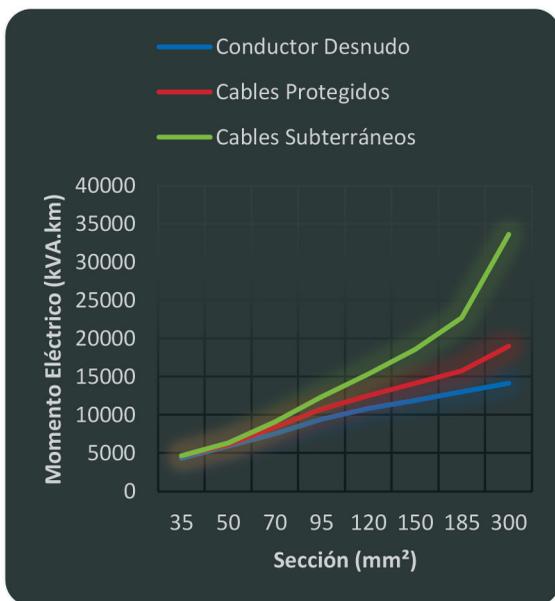


Figura 3. Momento eléctrico en función de sección del conductor

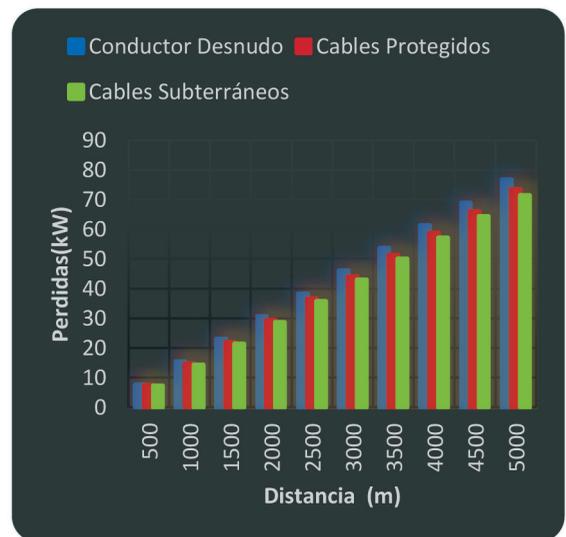


Figura 4. Pérdidas técnicas

Por otra parte, notamos además que en secciones pequeñas, el sistema de cable protegido en disposición compacta tiene un comportamiento similar al cable subterráneo.

## Pérdidas técnicas

Efectuando un análisis en lo que respecta a pérdidas técnicas, podremos observar que las redes compactas con cable protegido poseen menores pérdidas que las redes convencionales con conductores desnudos, y además se obtienen valores cercanos a los de las redes subterráneas.

## Aspectos económicos

En este apartado se procede con el análisis técnico-económico de distintos tipos de redes de media tensión.

Los indicadores de calidad de los actuales suministros y la energía no suministrada determinan las condiciones de prestación del servicio de energía eléctrica a través de los sistemas de distribución al usuario final.

A la hora de proceder con la elección del sistema conveniente para nuestra red, analizaremos lo siguiente:

Concepto	Elemento a considerar
Confiabilidad	Continuidad del servicio y caída de tensión
Seguridad	Distancias y corrientes de fuga
Economía	Inversión, costo operativo y pérdidas técnicas
Ecología	Tipo y frecuencias de podas
Costo - Beneficio	Valor presente de la inversión considerando costos operativos

Tabla 3. Consideraciones a tener en cuenta en proyectos

Mediante la instalación del cable protegido se verán disminuidos los trabajos de poda de los árboles en un 70% con respecto al cable desnudo, siendo esta una condición muy ventajosa por cuanto no solo se disminuye la poda de los árboles sino que se mantiene y se preserva la condición ecológica de la zona donde se encuentran instaladas las redes de energía.

Eliminando salidas de servicio por problemas de interferencia de redes con el medioambiente, se verán disminuidos:

- » Las intervenciones del personal operativo.
- » Los índices de frecuencia media de interrupciones.

$$(13) \text{ FMIK} = (\sum \text{interrupciones} \cdot P_{\text{afectada}}) / P_{\text{instalada}}$$

- » Los índices de tiempo total de interrupciones.

$$(14) \text{ FMIK} = (\sum \text{interrupciones} \cdot P_{\text{afectada}} \cdot t_{\text{duración}}) / P_{\text{instalada}}$$

Todo lo anterior conlleva a un mejoramiento en la calidad del servicio brindado al cliente.

## Comparación de los distintos sistemas

Para efectuar una comparación se adoptaron los siguientes sistemas de distribución:

- » Línea convencional desnuda con conductor de aleación de aluminio de 50 mm<sup>2</sup>.
- » Línea convencional con cable protegido de aleación de aluminio de 50 mm<sup>2</sup>.
- » Línea aérea compacta con cable protegido de aluminio 50 mm<sup>2</sup>.
- » Línea subterránea con cable de aluminio de 50 mm<sup>2</sup> aislado en XLPE.

	Conv. desnuda	Conv. prot.	Comp.	Subt.
Confiabilidad	Baja	Media	Alta	Muy alta
Seguridad	Baja	Media	Media	Muy alta
Interferencia con vegetación	Muy alta	Muy alta	Alta	
Acometidas	Simple	Simple	Simple	Comp.
Resistencias a descargas atmosféricas	Baja	Baja	Media	Alta
Localización de fallas	Fácil	Fácil	Fácil	Difícil

Tabla 4. Comparación de distintos tipos constructivos

En cuanto al costo de cada sistema, se efectuó un análisis comparativo de los mismos, los que arrojaron los siguientes resultados:

Sistema	Costo (\$/km)
Línea convencional con conductor desnudo	132.251,4
Línea convencional con cable protegido	181.065,99
Línea aérea compacta con cable protegido	249.458,3
Línea subterránea con cable aislado	3.506.289,2

Tabla 5. Costos de distintos tipos constructivos

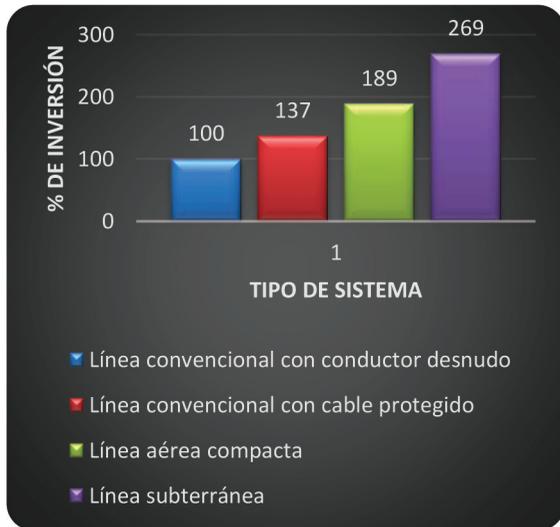
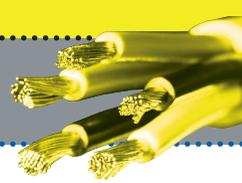


Figura 5. Costos de distintos tipos constructivos

### Aspectos ambientales

Dado a que los conductores están cubiertos con una capa de polietileno reticulado de alta densidad, permite montarlos más próximos a las ramas de los árboles, sin el riesgo de provocar cortocircuito en caso de contacto con las ramas o entre conductores.

Dicho contacto no puede ser mantenido por tiempos prolongados, debido a las descargas superficiales, generadas por el campo eléctrico no confinado en el aislante del cable protegido.

Este contacto prolongado puede producir la degradación del aislante con la consecuente falla del cable, por lo cual, en redes compactas con cables protegidos no se elimina la necesidad de efectuar mantenimiento y podas de conducción, pero, como se verá, a posteriori se reducen significativamente.

Nombramos anteriormente que al ser el cable protegido soporta el contacto con ramas, pero además al ser el cable tendido en disposición compacta, se logra una disminución del espacio ocupado por la línea, por lo cual, al realizarse podas de conducción, las mismas se deberán efectuar a razón del 30% en comparación con las podas realizadas en redes convencionales.

A continuación y a modo esquemático, se presenta un gráfico en donde se puede observar la poda necesaria en cada sistema.

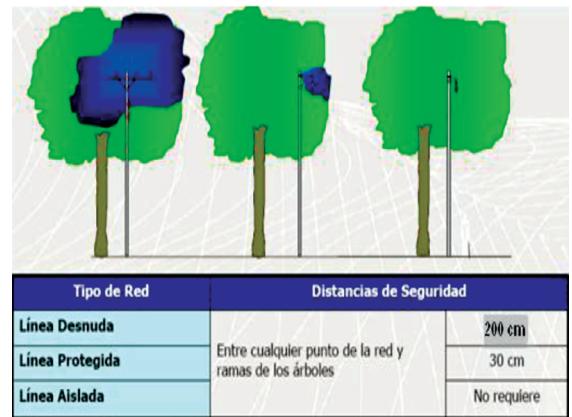


Figura 6. Podas de conducción

Vemos que mediante la implementación de las redes compactas protegidas, se reducen drásticamente los inconvenientes generados al medioambiente en su fase de explotación, demostrando la conveniencia de este sistema ante el utilizado en la actualidad.

### Aspectos de seguridad

Con el objetivo de estudiar las corrientes de fugas que aparecen en los cables protegidos al contacto con ramas, árboles, animales y personas cuando están en pleno funcionamiento, Hendrix y Westinghouse realizaron diversos ensayos sobre los cables protegidos.

Dichas corrientes de fuga se encuentran circulando por la cubierta del cable, y debido al desgaste de la misma, puede producirse un aumento del campo eléctrico en la superficie del aislante, lo que origina que se induzcan corrientes de mayor magnitud, provocando un envejecimiento del aislante, y la posible perforación del mismo.

Al ser el cable protegido un sistema no apantallado, no existe confinamiento pleno del campo eléctrico, razón por la cual la norma IRAM 63005 considera a estos cables como si fueran conductores desnudos y por lo tanto deberán llevar la leyenda “cables protegidos –no aislados– no tocar”.

Por último, dado a un menor espacio ocupado por la línea, puede ser utilizado en lugares donde las veredas sean estrechas para evacuar riesgos eléctricos con edificaciones en altura.

### Conclusiones

Con la implementación de las redes compactas protegidas, se logra una convivencia armoniosa de los cables con el medioambiente, ya que se reducen las podas de árboles tanto en frecuencia como en volumen, logrando una disminución de hasta un 70% del impacto ambiental, gracias a la reducción considerable de los espacios de montajes y franjas de seguridad, y además presentan una mayor estética, reduciendo el impacto visual.

Gracias a las virtudes del cable protegido de soportar el contacto no prolongado de las ramas de los árboles con los conductores, se disminuyen las interrupciones del servicio por cortocircuitos; y por otra parte dado a que cuenta con conductor portante, el cual actúa como hilo de guardia, se ven disminuidas las interrupciones debidas a descargas atmosféricas, lo cual desemboca en una mejor calidad de servicio y por lo tanto una mejor imagen empresaria de la prestadora del suministro.

Se reduce aproximadamente un 80% el costo de mantenimiento en este sistema en comparación con las redes convencionales, lo que repercute en el personal a cargo del mismo. Permite incrementar la potencia transmitida y además admite el montaje de circuitos múltiples con un pequeño incremento en las alturas de los soportes convencionales. Poseen una menor reactancia inductiva con respecto a las redes convencionales, lo cual repercute en una menor caída de tensión.

Por todo lo expuesto concluimos que las líneas aéreas compactas son una solución técnica y económicamente viable para efectuar la distribución en media tensión 13,2kV ■

### Bibliografía

La nota publicada se asienta sobre una extensa bibliografía que, por normas editoriales, no se publica. Por consultas de este tipo o cualquier otra vinculada a la temática, contactar a los autores.

### Contacto

Christian Hernán Arce, cha.arce@gmail.com

Martín Rodrigo Verger, mverger@epec.com.ar

**Nota del editor:** La nota aquí reproducida fue originalmente presentada por los autores en *CIDEL 2014* ■

*Por*

**Christian Hernán Arce**

**Martín Rodrigo Verger**

**UTN FRC – EPEC – CCC Ingeniería**