

# Cables subterráneos con cajas de empalme. Propuesta de normalización de ensayos previos a su puesta en servicio

Ing. Roberto Cáceres

**Resumen**—Una onda que viaje a través de un cable subterráneo con impedancia característica  $Z_C$ , si no encuentra variaciones de impedancia en su camino, llegará al final del mismo y, en el caso de que tenga una impedancia de carga  $Z_L = Z_C$ , no producirá una onda reflejada. Si este cable tuviese una o varias cajas de empalme con impedancias distintas a la característica, al alimentar una falla aguas abajo, por él circulará un frente de onda de hasta varios miles de Amper, que, al atravesar un caja de empalme que tenga una mayor impedancia a la del cable, disminuye su velocidad de propagación, pues la corriente encuentra una mayor resistencia a su paso. Por principio de conservación de la energía, ésta sólo puede generar mayor tensión para conservarse. Este aumento en la tensión, cuando la desadaptación de impedancias es grande, puede superar los límites de los materiales dieléctricos del empalme, (sobre todo en las cajas antiguas), produciendo una nueva falla. Para que evitar que ésto ocurra, en este trabajo se proponen dos ensayos, uno de adaptación de impedancias y otro de rigidez, denominados *De Puesta en Servicio*.

## I. INTRODUCCIÓN

La experiencia de realizar estos ensayos se obtiene de aplicarlos como Norma sobre la red subterránea de La Cooperativa, Empresa Eléctrica de Godoy Cruz, Mendoza, Argentina, que en la actualidad tiene 110 km de redes subterráneas, de los cuales un 70 % son del tipo aislado en papel impregnado (API no radiales) y resto con aislación seca ( radiales). Si bien se puede considerar que es una red mediana, los resultados son totalmente extrapolables.

Estas consideraciones prácticas se aplican desde 1980, con un seguimiento que, con 27 años de experiencia, se pueden considerar válidos.

En ese año, por ampliación de la zona de prestación de servicios de La Cooperativa, se recibieron redes subterráneas provenientes de Agua y Energía, mayormente del tipo API, y que presentaban un alto porcentaje de fallas en las cajas de empalme cuando el cable alimentaba una falla aguas abajo. Ésto llevó al estudio de la causa del problema, siendo que en todos los casos tenían su correspondiente ensayo de rigidez con valores de corriente fuga muy bajos, es decir, desde el punto de vista de su aislación, aptos para entrar en servicio. La conclusión fue, como se demuestra en este trabajo, que no se tenía en cuenta la necesaria adaptación de impedancias al construir el empalme.

Por ello se adoptó como práctica realizar dos ensayos que se denominaron: De Puesta en Servicio, uno de rigidez

y otro de reflectometría.

## II. ENSAYO DE RIGIDEZ

La Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) en su Reglamentación para líneas Eléctricas Exteriores en General [1], establece la tensión de ensayo a aplicar a cables nuevos, lo que se transcribe en la Tabla 1, con un coeficiente de disminución desde un 20 a un 50% de la tensión y el tiempo aplicado para los instalados, lo que es muy general, pero no especifica el valor límite de corriente de fuga que determina que el cable sea apto para su uso.

TABLA I  
TENSIONES DE ENSAYO SEGÚN LA AEA

Tensión	Configuración del campo eléctrico en el cable	Tensión de Prueba		Duración del ensayo minutos
		Alterna monof. KV	Continua KV	
B.T.	radial	2 E <sub>0</sub> + 2 HV	6 E <sub>0</sub> + 6 KV	15
M.T.	no radial	2 E M + 2 KV (1)	6 E M + 6 KV (3)	10
A.T.		1,73 E <sub>0</sub>	4 E <sub>0</sub>	15

**E<sub>0</sub> : Tensión nominal de aislación entre un conductor aislado cualquiera y tierra en kV. Según Normas correspondientes al cable.**

**E = Tensión nominal de aislación en kV entre dos conductores aislados cualquiera del cable.**

$$EM = 0,5(E_0 + E)$$

**(1) Esta prueba debe realizarse aplicada entre cada conductor y los demás unidos a la vaina metálica.**

Por ello, teniendo la certeza de que los cables nuevos han sido debidamente construidos de acuerdo a Normas vigentes [2],[3] y ensayados en fábrica, se determinó:

- Un valor práctico de tensión de ensayo.
- La máxima corriente de fuga a aceptar para determinar si un cable es apto para su uso.

El ensayo se aplica a cables nuevos (después de instalarlos) o en uso, si han sido reparados.

La tensión continua de ensayo aplicada VE, surge de considerar el pico de la tensión alterna de servicio entre fases, más un 20 % :

$$VE = 13,2 \sqrt{2} \cdot 1,2 = 22,5 \text{ kV} \quad (1)$$

La prueba se realiza entre cada conductor y los demás unidos la vaina metálica y tierra.

El tiempo es el de la Reglamentación de la AEA = 10 o 15 minutos (no radial y radial respectivamente).

$$\text{Máxima corriente admisible: } 200 \mu\text{A} \quad (2)$$

Cuando la corriente supera este valor, se procede como con un cable con una falla, se la ubica y repara.

### III. ENSAYO REFLECTOMÉTRICO

No es el objetivo de este trabajo realizar un desarrollo de la teoría de propagación de ondas electromagnética, la que es ampliamente tratada en la bibliografía especializada [4],[5],[6],[7],[8], y que se supone conocida. Por ello sólo se recurrirá a lo necesario para la comprensión del método de ensayo propuesto.

Los cables subterráneos utilizados en las redes de distribución en media tensión se pueden comparar con un cable coaxil, pues cada conductor forma, junto con su malla metálica externa, una estructura que es muy parecida a este tipo de cables, si la malla metálica es tratada de la misma manera que la pantalla externa de un cable coaxil.

Esta similitud es casi perfecta en los cables aislados con papel impregnado en aceite, con cobertura de plomo (no radiales), y en los de aislación seca con campos radiales.

El tipo de estructura y de aislación utilizada influyen en la impedancia característica y en la velocidad de propagación en el cable.

Siendo la impedancia característica del cable:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

$Z_c$  = Impedancia característica

$L$  = Inductancia por unidad de longitud ( $\mu\text{H}/\text{km}$ )

$C$  = Capacidad por unidad de longitud ( $\mu\text{F}/\text{km}$ )

Y la velocidad de propagación:

$$v_p = \frac{l}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4)$$

$v_p$  = Velocidad de propagación ( $\text{m} / \mu\text{s}$ )

$l$  = Longitud del cable (m)

$c$  = Velocidad de la luz

$\epsilon_r$  = Constante dieléctrica relativa del medio en el cual se propaga la onda.

#### A. Coeficiente de reflexión

Cada discontinuidad en el cable produce un cambio en sus características de transmisión y, por lo tanto, una reflexión. Por ello, una parte de la energía incidente (dirección positiva), es reflejada produciendo una onda que se propaga desde el punto en que se encuentra la perturbación, hacia la fuente (dirección negativa).

En la Fig. 1 se esquematiza este caso para la tensión, siendo  $V_p$  la onda incidente y  $V_r$  la reflejada que se origina por haber encontrado en su recorrido, una impedancia distinta a la  $Z_c$  del cable.

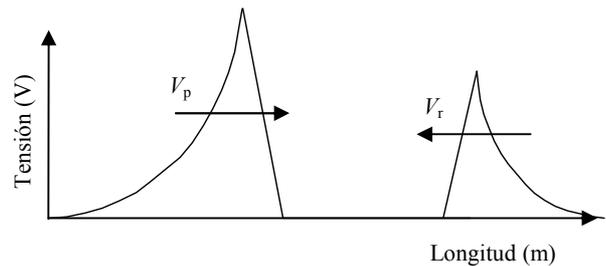


Fig. 1. Ondas incidente ( $V_p$ ) y reflejada ( $V_r$ ).

Con las siguientes fórmulas se expresa el valor de la tensión ( $V$ ), de la corriente ( $I$ ) en punto cualquiera del cable

$$V = V_p + V_r \quad (5)$$

$$I = \frac{V_p}{Z_c} - \frac{V_r}{Z_c} \quad (6)$$

Siendo  $r$  el coeficiente de reflexión, que se expresa como la relación entre las ondas reflejada e incidente, en cada punto de recorrido.

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (7)$$

A partir de aquí se analizan cuatro casos típicos :

1) La línea termina en una carga de impedancia igual a la característica (no hay onda reflejada).

$$Z_L = Z_c$$

2) La carga es un circuito abierto (la onda reflejada tiene igual fase que la incidente).

$$Z_L = \infty$$

3) La carga es un cortocircuito (la onda reflejada tiene fase contraria a la incidente).

$$Z_L = 0$$

4) La carga tiene una discontinuidad antes de su finalización que producirá una onda reflejada cuya intensidad y signo dependerán de la desadaptación de

impedancias que exista.

$$Z_L \neq Z_C.$$

### B. Cajas de empalme

De estos cuatro casos, sólo analizaremos el cuarto caso, que es el producido por una caja de empalme que une tramos de un mismo cable que, por ejemplo, se reparó, o cables distintos en su sección o tipo (por ejemplo cajas de transición aceite-seco)

En la caja de empalme, normalmente las distancias de los elementos aislantes son mayores que en el resto del cable. Esto incrementa la inductancia y disminuye la capacidad. Si llamamos  $Z_B$  a la impedancia característica de la caja de empalme, esta será, de acuerdo a la Ecuación 3, mayor que al resto del cable. Es decir:  $Z_B > Z_C$ .

En la Fig. 2 se representa una caja de empalme.

La posición 1 indica la entrada a la caja de empalme, mientras que la 2 indica la salida. La caja de empalme tiene entonces dos reflexiones sucesivas,  $r_1$  y  $r_2$ , producidas por el pasaje a través de la impedancia  $Z_C$  a  $Z_B$  y de  $Z_B$  a  $Z_C$  respectivamente.

Los coeficientes de reflexión, expresados en función de las impedancias, son:

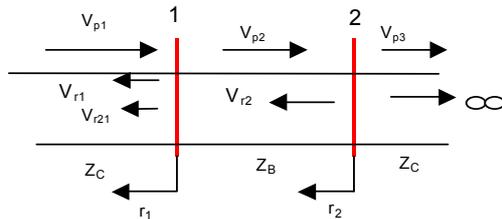


Fig. 2. Esquema de una caja de empalme.

$$r_1 = \frac{Z_B - Z_C}{Z_B + Z_C} \quad (8)$$

$$r_2 = \frac{Z_C - Z_B}{Z_C + Z_B}$$

Cuando  $Z_C < Z_B$ :

$r_1 > 0$  y  $r_2 < 0$  (negativo)

$r_1 = -r_2$

Y viceversa para  $Z_C > Z_B$

En la posición 1, aplicando el criterio expresado en la ecuación (5) al voltaje incidente  $V_p$  y al reflejado  $V_r$ , se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{p2} &= V_{p1} + V_{r1} \\ V_{r1} &= r_1 V_{p1} \\ V_{p2} &= V_{p1} (1 + r_1) \end{aligned} \quad (9)$$

El voltaje  $V_{p2}$  es la onda incidente después de pasar por la posición 1 (entrada a la caja de empalme) y es el que debe soportar la caja de empalme, aún en caso de cortocircuito aguas abajo

Para la posición 2 (salida de la caja de empalme) se tiene:

$$\begin{aligned} V_{p3} &= V_{p2} + V_{r2} \\ V_{r2} &= r_2 V_{p2} \\ V_{p3} &= V_{p2} (1 + r_2) \end{aligned} \quad (10)$$

La tensión reflejada  $V_{r2}$  al alcanzar la posición 1, tiene la reflexión  $r_2$  (pasaje de  $Z_B$  a  $Z_C$ ).

$$\begin{aligned} V_{r21} &= r_2 (1 + r_2) V_{p2} \\ V_{r1} &= r_2 (1 + r_2) (1 + r_1) V_{p1} \end{aligned} \quad (11)$$

pero

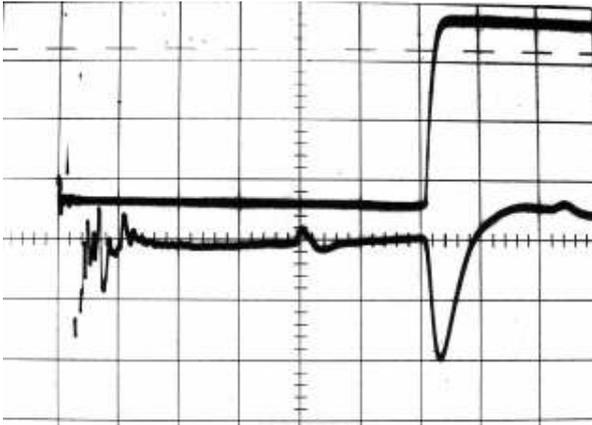
$$\begin{aligned} r_1 &= -r_2 \\ V_{r21} &= -r_1 (1 - r_1^2) V_{r1} \end{aligned} \quad (12)$$

La tensión  $V_{r1}$ , que es la reflexión provocada en la posición 1 a la entrada de la caja de empalme, es positiva

La tensión  $V_{r2}$ , que es la reflexión provocada en la posición 2 a la salida de la caja de empalme y hacia el fin del cable, es negativa.

La Fig. 3 muestra las reflexiones que se observan. La mayor atenuación de las componentes de alta frecuencia producen esta imagen típica en forma de "S". La imagen corresponde al Distribuidor Zona Industrial y muestra un tramo de 1.023 m, con una  $v_p/2 = 83,1$  m/ $\mu$ s. El cursor se encuentra sobre el final del cable, que está cortocircuitado para una mejor visualización.

Las imágenes de este trabajo fueron tomadas utilizando una cámara convencional, realizándose en esa época el trabajo de confección del positivo a escala 1:1 mediante un laborioso trabajo artesanal de un fotógrafo profesional, para utilizarla como comparación en el momento en que el cable presentase una falla. En la actualidad, con la tecnología digital disponible, se resuelve el problema en forma instantánea.



**Fig. 3. Imagen de una caja de empalme en forma de "S".**

Se pueden calcular las pérdidas (o atenuación) que sufrirá  $V_{p1}$  por la reflexión en la caja de empalme hasta transformarse en  $V_{p3}$

$$V_{p3} = V_{p2}(1 + r_2)$$

$$V_{p3} = V_{p1}(1 + r_2)(1 + r_1) \quad (13)$$

Entonces

$$\frac{V_{p3}}{V_{p1}} = 1 - r_1^2$$

$$V_{p3} = V_{p1}(1 - r_1^2) \quad (14)$$

El coeficiente de reflexión de una caja de empalme depende entonces, en gran medida, de su tipo de construcción.

Ejemplo :  $Z_C = 50 \Omega$  y  $Z_B = 1,2 * 50 = 60\Omega$ , entonces  $r_1 = 0,09$ . Según (14),  $V_{p3} = 0,99 V_{p1}$ , es decir que la atenuación de  $V_{p1}$  será de aproximadamente un 1 %.

#### IV. PROPUESTA DE LÍMITE DE DESADAPTACIÓN

Teniendo en cuenta que no está normalizado el ensayo de adaptación de impedancias que determine hasta qué valor de desadaptación es posible aceptar, y considerando que la práctica así lo demuestra, se propone que el límite máximo aceptable para considerar al cable apto para su uso es el siguiente:

$$Z_B \leq 1,2 Z_C \quad (15)$$

Lo que produce un coeficiente de reflexión  $r_1$

$$r_1 \approx 9\% \quad (16)$$

#### V. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

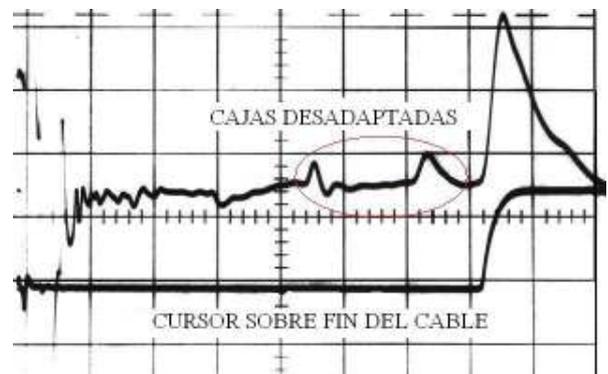
Se propone un método práctico para el cálculo de estos valores, realizable con una simple medición efectuada con el reflectómetro.

Una referencia clara en la imagen la da el fin del cable, en cortocircuito o a circuito abierto, por ello, despreciando la atenuación en el cable y sus empalmes, se la considera como tal, es decir  $xx (V \text{ o } mm) = 100 \%$ . Se mide la reflexión en el empalme (V o mm) y se la compara con la referencia, no debiendo superar el 10 % del pico de la onda reflejada por el final del cable.

Ejemplos:

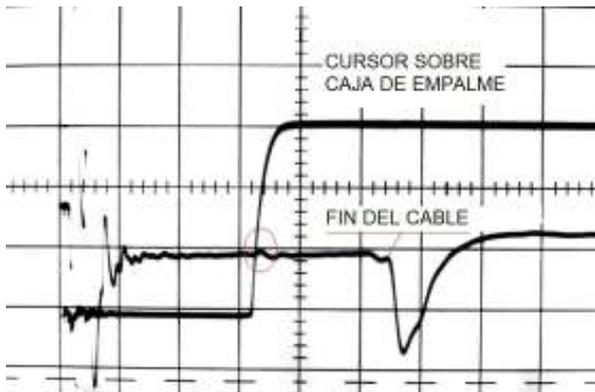
1) En la Fig. 4 se muestran dos cajas de empalme. El tramo observado es de 543 m y corresponde al Distribuidor Plaza Godoy Cruz, desde CT 1296 a CT 1029. La imagen fue tomada en Abril de 1985. La  $v_p/2 = 82,8$  m/ $\mu$ s.

En este caso el pulso reflejado por el fin del cable es de 28 mm. Las imágenes de las cajas de empalme son el 15 y 20 % de este valor, por lo tanto, según Ecuación (16), no son aptas para su puesta en servicio.



**Fig. 4. Cajas de empalme con una gran desadaptación de impedancias.**

2) En la Fig. 5 se muestra un cable con dos cajas de empalme debidamente adaptadas, que prácticamente no se ven en la imagen. El cursor está sobre la primera de ellas y la segunda está 20 m antes de la finalización del cable. El tramo corresponde al Distribuidor Puntilla, desde CT 5 a CT 7, es de 443 m. La  $v_p/2 = 80,1$  m/ $\mu$ s. La imagen fue tomada en Octubre de 1984.



**Fig. 5. Imagen de dos cajas de empalme con una correcta adaptación de impedancias.**

Para lograr aprobar estos ensayos fue necesaria una capacitación adicional al personal que trabaja en redes subterráneas.

#### VI. CONCLUSIÓN

Es práctica común realizar sólo el ensayo de rigidez dieléctrica antes de poner en servicio un cable subterráneo que ha sido reparado, pero el resultado del mismo da una visión parcial del estado del cable y sus empalmes, muy útil para las condiciones normales de uso. Para completar la visión, es necesario realizar un ensayo de adaptación de impedancias con un reflectómetro convencional, lo que es muy sencillo y rápido. Este ensayo es sumamente útil pues nos indicará el comportamiento del cable en situación de emergencia, es decir, cuando tenga que conducir una carga miles de veces mayor a la normal y que atraviesa las cajas de empalmes que tenga.

Si éstas han sido debidamente construidas, y verificadas con los ensayos reflectométrico y de rigidez, soportarán perfectamente el paso de esta corriente, sin generar sobre tensiones. El seguimiento de este comportamiento se realiza desde el año 1980. Desde entonces, prácticamente ningún cable con cajas de empalme que haya aprobado los **Ensayos de Puesta en Servicio**, ha fallado.

El beneficio económico y técnico que esto trae aparejado es muy difícil de cuantificar.

#### VII. AGRADECIMIENTOS.

El autor agradece al Sr. César Correa (hoy jubilado) su trabajo como fotógrafo profesional y al Sr. Mario Avila, quien tiene a cargo el Laboratorio Móvil, su colaboración en los ensayos.

#### VIII. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) Reglamentación para líneas Eléctricas Exteriores en General . Art. 17
- [2] IRAM 2178 :Cables de energía aislados con dieléctricos sólidos extruídos para tensiones nominales de 1,1 kV a 33 kV.
- [3] IRAM 2160: Cables con conductores de cobre y aluminio, aislados con papel impregnado y vaina metálica. Para transporte y distribución de energía eléctrica con tensiones máximas de hasta 36 kV.
- [4] Manual del Reflectómetro con calculador digital Balteau RCD 5. Balteau Ensayeurs Electricques.
- [5] Puliafito, Salvador. Propagación y Radiación de Ondas Electromagnéticas. Parte II. 2ª Edición. Editorial Idearium.1985.
- [6] Campoy, Roberto. Sobretensiones producidas por interruptores automáticos de potencia de 13,2 kV y su efecto sobre los empalmes y terminales de cables subterráneos.
- [7] Andrews, J., Automatic Network Measurements in the Time Domain, PROC.IEEE, vol. 66, no. 4, April 1978, pp. 414-423.
- [8] Cole, R., Time-Domain Spectroscopy of Dielectric Materials, IEEE Trans. I&M, vol.IM25, no.4, Dec.1976.

#### IX. BIOGRAFÍA

**Roberto Cáceres.** Nació en Uspallata, Mendoza, Argentina, el 05/01/54. Se graduó en 1980 como Ingeniero en Electrónica en la Universidad Tecnológica Nacional , Mendoza, Argentina.

Desde el año 2003, es Sub Gerente Comercial de La Cooperativa, Empresa Eléctrica de Godoy Cruz, Mendoza, Argentina, a la que ingresó en 1975.

Desde 1979 y hasta 2006, tuvo a cargo el Sector Ensayos y Ubicación de Fallas en media y baja tensión.

A partir de 1980, es responsable del Área Mediciones de esta Cooperativa.

Es Delegado General ante el IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación), y miembro del Subcomité de Medidores Eléctricos.

Es miembro del IEFIUM , Instituto de Energía de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Mendoza, Argentina.

Ha publicado varios trabajos y dictado numerosos cursos referidos a la medición de la energía y a calidad de potencia.

