

DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN FRECUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PROPAGACIÓN EN CABLES DE ALTA TENSIÓN

R. E. ALVAREZ*
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

D. A. ESTEBAN
IITREE-LAT-FI-UNLP
Argentina

Resumen – Existen diferentes controles y ensayos para verificar el estado del aislamiento que conforman los cables de alta tensión, siendo el ensayo de descargas parciales una de las pruebas eléctricas de mayor sensibilidad.

Una de las particularidades distintivas de estas pruebas en cables (fuera de laboratorio) es que por lo general el nivel de las magnitudes eléctricas medidas para caracterizar las descargas es muy inferior al nivel de las perturbaciones inducidas por fuentes externas. Por lo tanto, el estudio de las características de propagación de las señales eléctricas en el cable resultan fundamentales para comprender y caracterizar la propagación de las señales generadas por las descargas. Esto es aún más complejo y sensible dado que se requiere determinar el comportamiento en alta frecuencia (1 GHz) del cable; ya que se encuentran involucrados diversos factores como la adaptación de impedancias, ruido externo, procesamiento de las mediciones, etc. para que los resultados obtenidos sean realistas.

En el presente trabajo se describen los procedimientos de medición, caracterización de los instrumentos y resultados de las mediciones realizadas para determinar el comportamiento en frecuencia de las características de propagación de una muestra de cable (XLPE) de alta tensión.

Palabras clave: cables, XLPE, descargas parciales, propagación, ensayos, alta frecuencia

1 INTRODUCCIÓN

La aplicación de cables de media y alta tensión ha proliferado sustancialmente en las últimas décadas. Si bien la tasa de fallo con este tipo de redes se ha disminuido notablemente, es importante destacar que una salida intempestiva del servicio ocasionará una indisponibilidad del servicio a un gran número de usuarios.

Existen diferentes controles y ensayos para verificar el estado del aislamiento del cable; ya sea al cabo del proceso de fabricación, luego del montaje y durante su funcionamiento (mantenimiento predictivo). En ese sentido una de las pruebas eléctricas de mayor sensibilidad para determinar el estado del aislamiento del cable es la de descargas parciales.

En el presente trabajo, se detallarán los procedimientos y resultados que han sido utilizados para determinar las características de propagación y el comportamiento en frecuencia de un cable de 132 kV en aislamiento XLPE, de 630 mm² de sección.

2 ENSAYOS DE DESCARGAS PARCIALES

Mediante esta prueba, y a partir de patrones de descargas, es posible diagnosticar cual es la fuente de la descarga y su naturaleza. De esta forma, a partir de la previa calibración del sistema es posible conocer la proporcionalidad entre la magnitud medida y la descarga parcial real provocada por un determinado punto defectuoso en la instalación. Sin embargo este procedimiento presenta dificultades prácticas en los cables puesto que en la mayoría de los casos es imposible inyectar un pulso de calibración en una zona cercana al lugar donde está localizado el defecto; situación óptima para determinar una correcta correlación entre la magnitud medida y la descarga real.

Actualmente las mediciones en redes de cables se realizan aplicando un pulso de calibración en los puntos más fácilmente accesibles. No obstante, estos puntos pueden resultar situados muy lejos del lugar del defecto con lo que no resulta fácil correlacionar la magnitud medida por el sensor con la verdadera magnitud de la descarga parcial situada en una posición arbitraria. Esta situación es mucho más compleja cuando el ensayo

solo puede realizarse con otros equipos interconectados al cable (transformadores, GIS, sistemas “Cross Bonding”, etc).

Por lo expuesto, se puede afirmar que el estudio de las características de propagación y del comportamiento en el dominio de la frecuencia y del tiempo de las señales eléctricas en el cable resultan fundamentales para comprender y caracterizar la propagación de las señales generadas por las descargas. Para realizar esta caracterización se requiere del uso de técnicas de medición con instrumental específico y claros procedimientos operativos. Esto es aún más complejo y sensible dado que se requiere determinar el comportamiento en alta frecuencia (1 GHz) del cable; esto involucra la consideración de diversos factores como la adaptación de impedancias, ruido externo, procesamiento de las mediciones, etc. para que los resultados obtenidos sean realistas.

3 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PROPAGACIÓN

Las características de propagación de un cable quedarán definidas conociendo:

- Velocidad de propagación, v
- Permitividad relativa, ϵ_r
- Tiempo de retardo, td

3.1 Velocidad de propagación

Si se considera una línea de impedancia Z_0 y de longitud l (Fig. 1), la onda de tensión que parte del generador hacia la carga situada en el extremo opuesto de la línea se denomina onda incidente.

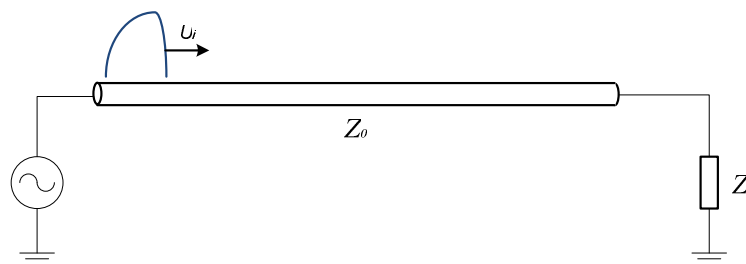


Fig. 1 - Onda de tensión que se propaga en una línea

Esta onda de tensión y su onda de corriente asociada serán de la forma:

$$U = U_2 \cos(\beta l) + j Z_0 I_2 \sin(\beta l) \quad (1)$$

$$I = I_2 \cos(\beta l) + j \frac{U_2}{Z_0} \sin(\beta l) \quad (2)$$

Si la línea esta en vacío, es decir $Z_c \rightarrow \infty$ se tiene que $I_2 = 0$; y además:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

Se obtiene:

$$U = U_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (4)$$

$$I = j \frac{U_2}{Z_0} \sin \frac{2\pi}{\lambda} l \quad (5)$$

A partir de ello, con un generador de frecuencia variable se midió la respuesta para obtener la frecuencia para

la cual la longitud eléctrica del cable, que es $\lambda/4$, y coincide con su longitud física. El método de ensayo

consistió en variar progresivamente la frecuencia hasta detectar el primer mínimo de la relación ub/ua (Fig. 2). A partir de ello, se tiene que:

$$v = \lambda f_c \quad (6)$$

Luego se puede plantear que; para la frecuencia f_c la longitud física l_f es:

$$l_f = \frac{\lambda}{4} \quad (7)$$

A partir de (6) y (7) se tiene que:

$$v = 4 l_f f_c \quad (8)$$

En las mediciones, se verificó que $f_c = 4,2283$ MHz. En la Fig. 3 se representa el resultado obtenido; en donde se observa claramente la frecuencia f_c .

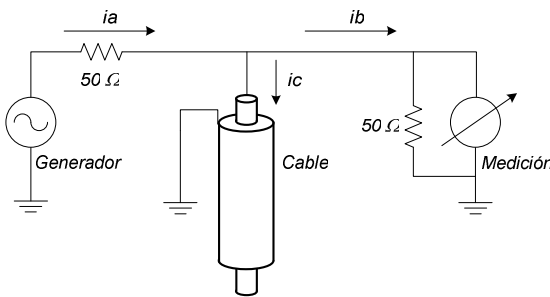


Fig. 2 - Circuito empleado para determinar la

longitud eléctrica $\lambda/4$

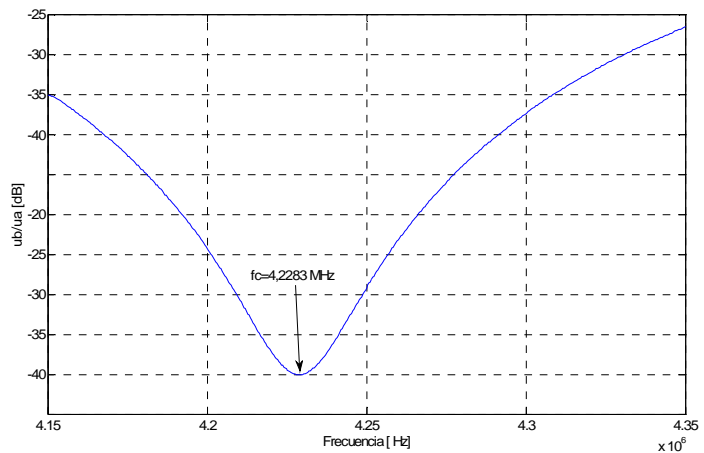


Fig. 3 - Determinación de la frecuencia f_c

A partir de lo expuesto se tiene que la velocidad de propagación del cable es:

$$v = 4 l_f f_c = 4.11,04 \text{ m} \cdot 4,2283 \text{ MHz} = 187\,229\,124 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (9)$$

3.2 Permitividad relativa

Una vez determinada la velocidad de propagación es posible calcular el valor de la permitividad relativa ϵ_r como:

$$\epsilon_r = \left[\frac{c}{v} \right]^2 = \left[\frac{299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{187229124 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right]^2 = 2,56 \quad (10)$$

3.3 Tiempo de retardo

Si l_f es la longitud física total de la línea; el tiempo t_d que tarda una onda en recorrer la distancia entre el generador y la carga (Fig. 1) se tiene que:

$$t_d = \frac{l_f}{v} = \frac{l_f}{4 l_f f_c} = \frac{1}{4 f_c} = \frac{1}{4 \cdot 4,2283 \text{ MHz}} = 58,12 \text{ ns} \quad (11)$$

El tiempo de retardo calculado con (11) es determinado indirectamente, a partir de la frecuencia f_c . Para verificar este valor de t_d , también se realizó un simple ensayo mediante el cual se midió en forma directa dicho tiempo. El método consistió en aplicar una señal tipo escalón en un extremo del cable; y registrar con un osciloscopio las señales en ambos extremos (Fig. 4).

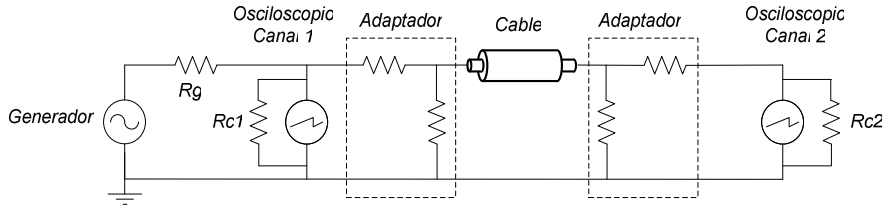


Fig. 4 - Disposición para la medición del tiempo de retardo, t_d
 R_g : impedancia interna del generador de señales (50Ω)
 R_{c1} y R_{c2} : impedancia de los canales 1 y 2 del osciloscopio (50Ω)

En la Fig. 5 se presenta el resultado del ensayo, donde puede observarse que el desfase temporal de la onda incidente y la onda en el final del cable es de $58,6 \text{ ns}$; es decir, que se ha obtenido un tiempo de retardo muy similar al calculado a partir de la frecuencia f_c .

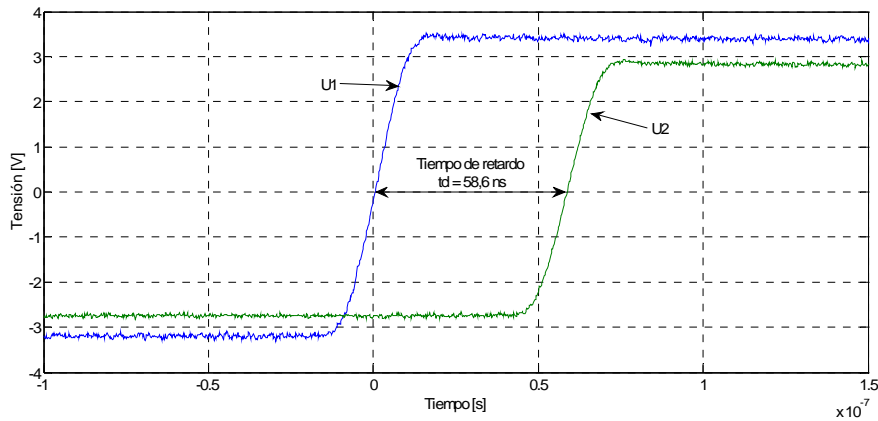


Fig. 5 - Medición del tiempo de retardo, t_d

4 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El análisis de respuesta en frecuencia (Frequency Response Analysis, FRA) es una técnica de ensayo mediante la cual se aplica una señal de prueba senoidal con el fin de medir los puntos de la respuesta de frecuencia de una función de transferencia o impedancia. Básicamente consiste en aplicar una tensión o corriente sinusoidal (por ejemplo) de frecuencia variable a la entrada de la línea, y medir la tensión (módulo y fase) en el extremo receptor, como se indica en el esquema de la Fig. 6.

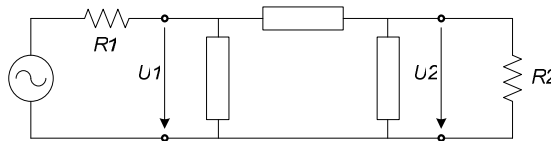


Fig. 6 - Barrido en frecuencia de una línea (modelo pi)

A partir de ello se puede plantear que la potencia de entrada P_1 y de salida P_2 son:

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_1'} \quad (12)$$

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_2} \quad (13)$$

R_1' es la resistencia equivalente que “ve” el generador con su resistencia interna R_1 . Luego, si la línea se encuentra adaptada; de forma de evitar las reflexiones en el extremo final del cable; se tiene que $R_1' = R_2 = Z_0$; es decir que la transferencia de potencia será:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2^2 R_1}{R_2 U_1^2} = \frac{U_2^2}{U_1^2} \quad (14)$$

A partir de ello, operando se tiene que:

$$10 \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \log \left(\frac{U_2^2}{U_1^2} \right) = 20 \log \left(\frac{U_2}{U_1} \right) \quad (15)$$

Considerando variable la frecuencia ω del generador; el módulo y fase de la función de transferencia del circuito resultan respectivamente:

$$\left| T(j\omega) \right|_{dB} = 20 \log \left[\frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} \right] \quad (16)$$

$$\phi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}[T_1(j\omega)]}{\text{Re}[T_1(j\omega)]} \quad (17)$$

La ventaja distintiva del FRA se basa en su frecuencia selectiva natural; sólo una componente del espectro es extraída. Esto es de suma importancia cuando el sistema tiene características resonantes determinadas. De esta forma es posible identificar y estudiar ciertas resonancias sin alterar los otros modos oscilatorios. Las respuestas obtenidas (16) y (17) se representan gráficamente en diagramas de *Nyquist* o *Bode*.

4.1 Adaptación del cable

Para la diseñar la adaptación deben considerarse las impedancias internas del generador de señales (U_1) y del instrumento que medirá la tensión en el extremo final (U_2); y obviamente la impedancia característica del cable. Como puede observarse en (13); para que el sistema esté perfectamente adaptado, y con ello evitar las reflexiones en los extremos del cable, es necesario cumplir con la condición $R_1' = R_2 = Z_0$.

Para el ensayo de barrido en frecuencia se empleó un analizador de espectro con generador de tracking, en el cual la impedancia del generador (R_1) y del canal de medición (R_2) tienen un valor de 50Ω .

Por otro lado, considerando una permitividad relativa de $\epsilon_r = 2,3$ (la especificada por el fabricante del cable) la impedancia característica del cable resulta:

$$Z_{10} = 59,945 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln D/d = 59,945 \frac{1}{\sqrt{2,3}} \ln 67,5/31,5 = 30,1 \Omega \quad (18)$$

Estas condiciones el coeficiente de reflexión en la interface instrumento/cable es $\rho_1 = -0,23$ y en la interface cable/instrumento $\rho_2 = 0,23$. Por ejemplo, en el extremo 2 del cable, se reflejaría el 23% de la señal incidente. Es decir que para adaptar la medición debe lograrse que $\rho_1 = \rho_2 = 0$; para ello se ha considerado un cuadripolo tipo "T" con dos resistencias R_s y R_p de acuerdo al esquema de la Fig. 7.

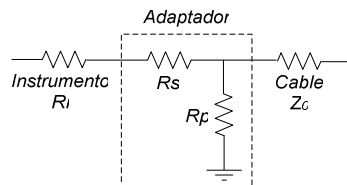


Fig. 7 - Adaptador de impedancias "T"

A partir de ello, se puede plantear:

$$R_c = \frac{(R_i + R_s)R_p}{(R_i + R_s) + R_p} \quad (19) \quad R_i = \frac{R_c R_p}{(R_c + R_p)} + R_s \quad (20)$$

Resolviendo estas dos ecuaciones con dos incógnitas (R_p y R_s) se obtiene que $R_p = 46,8 \Omega$ y $R_s = 32 \Omega$.

Una vez definidos los valores de las resistencias que compondrán el adaptador, es necesario considerar ciertos criterios de diseño. El primero de ellos se relaciona con el comportamiento de una resistencia en alta frecuencia. Para caracterizar el comportamiento real de una resistencia de carbón se suele emplear un circuito equivalente de parámetros concentrados (Fig. 8) que presente un comportamiento similar al que se obtiene al medir la impedancia de dicho componente en cuestión.

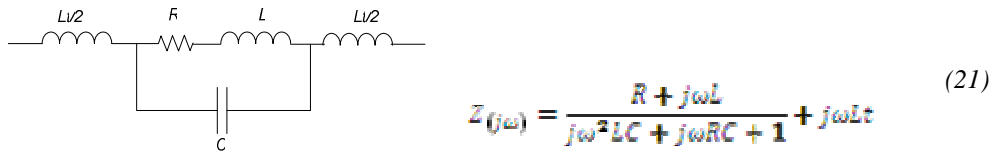


Fig. 8 - Modelo equivalente para un resistor de composición o película de carbón

En dicho modelo R es la resistencia en continua; L representa la inductancia del elemento resistivo (algunos nanohenry); C (de 0,1 a 1,5 pF; más grande a mayor potencia) representa la capacidad equivalente paralelo; y $Lt/2$ representa la inductancia de los terminales (decenas de nanohenry). En el modelo se verifica fácilmente que a baja frecuencia el comportamiento de la respuesta está gobernado únicamente por el valor propiamente dicho de R ; pero al aumentar progresivamente la frecuencia el efecto de la inductancia y la capacidad (respectivamente) comenzarán a pesar. Luego para valores de frecuencia bajos, se tiene que $Z = R$, y para elevados valores de frecuencia:

$$Z(j\omega) \cong j\omega Lt \quad (22)$$

Para fijar ideas de esta situación, a una frecuencia de 1 GHz; y con un valor de $L = 5$ nHy; $Lt/2 = 1,5$ nHy; y con $C = 0,1$ pF; se tiene que:

$$\omega L = 31 \text{ } \Omega \quad 1/\omega C = 1591 \text{ } \Omega \quad \omega Lt/2 = 94 \text{ } \Omega$$

Para el caso de la rama paralelo del adaptador, se observa que los valores de las reactancias son del orden al valor de la resistencia R_p ; en otras palabras los efectos parásitos pesan significativamente. Para compensar estos efectos, en vez de considerar un único resistor en derivación, se consideraron “ n ” resistores en derivación de tal forma que el paralelo total resulte $R_p = 46,8 \text{ } \Omega$. De esta forma; las inductancias y capacidades de cada uno de los “ n ” resistores quedan en derivación y con ello su efecto se reduce significativamente. En este caso particular, se consideraron 24 resistores de 1,1 k Ω ; resultando una resistencia equivalente de $1,1 \text{ k}\Omega / 24 = 45,8 \text{ } \Omega$. Con esta disposición y considerando el mismo ejemplo anterior, es decir una frecuencia de 1 GHz; la impedancia inductiva y capacitiva total resultará:

$$\omega L = 1,29 \text{ } \Omega \quad 1/\omega C = 66,31 \text{ } \Omega \quad \omega Lt/2 = 3,9 \text{ } \Omega$$

A su vez, las 24 resistencias se han dispuesto de forma tal que queden colocadas en forma radialmente equidistantes. De esta forma la corriente derivada hacia la pantalla es geoméricamente uniforme, evitando que las corrientes de alta frecuencias “vean” caminos con diferente resistencia. Un análisis similar se realiza para el caso de la resistencia serie del adaptador. En este caso para minimizar lo máximo posible el valor de la inductancia, R_s se dispuso inmediatamente después a los terminales de R_p , de forma tal de minimizar los efectos de la inductancia de los terminales $Lt/2$ (Fig. 9).

Finalmente, como en altas frecuencias las mediciones tienden a ser susceptibles al ruido externo; se diseñó un blindaje metálico (Fig. 10) de tal forma que se apantalla cada uno de los adaptadores; incorporando conectores del tipo BNC en las terminaciones

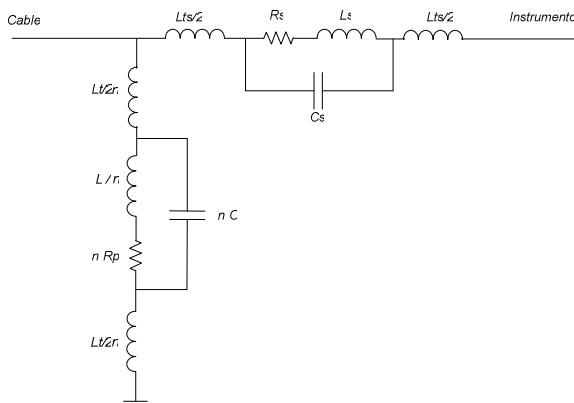


Fig. 9 - Esquema del adaptador de impedancias



Fig. 10 - Adaptadores y pantallas

Para verificar el comportamiento en frecuencia de la configuración diseñada, se realizó una simulación en ATPDraw empleando la función “frequency scan” considerando los adaptadores interconectados entre sí (Fig. 11), simulando el procedimiento de calibración que se describirá a posterior.

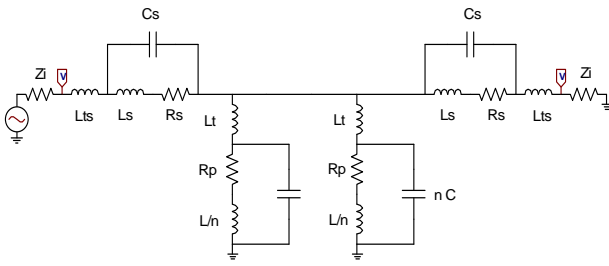


Fig. 11 - Modelo ATPDraw para los adaptadores

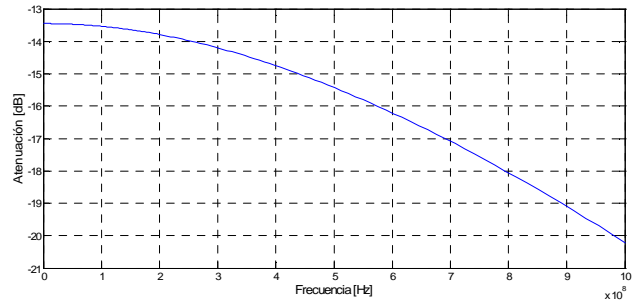


Fig. 12 - Atenuación de los adaptadores usando el modelo en ATP Draw

Una vez que se comprobaron valores razonables de diseño, se procedió a realizar una calibración de los adaptadores, que consistió en la realización de un barrido en frecuencia de los adaptadores interconectados entre sí; sin tramo de cable alguno. De esta forma, se determinó el comportamiento real en frecuencia de los adaptadores (Fig. 13 y Fig. 14); lo que permite verificar hasta que frecuencia el adaptador tiene una respuesta razonable y obtener una característica de atenuación, que luego se descontará a la característica de atenuación del cable.

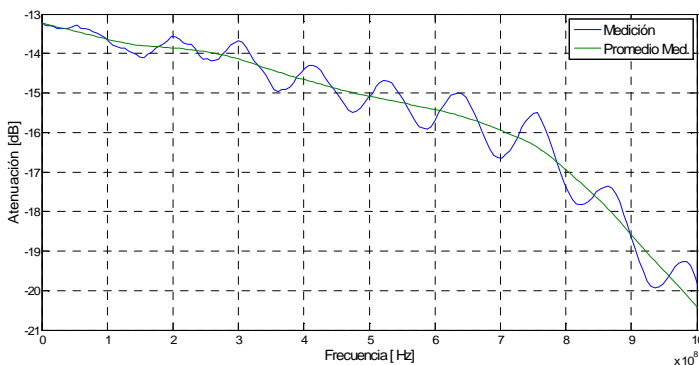


Fig. 13 - Atenuación medida de los adaptadores hasta 1 GHz

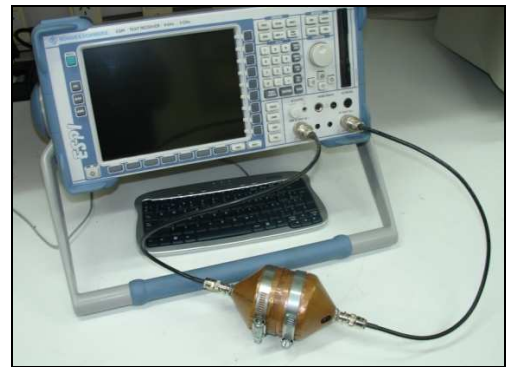


Fig. 14 - Calibración de los adaptadores

4.2 Ensayo de barrido en frecuencia

Una vez realizadas las adaptaciones de los cables, se instalaron en los terminales para la realización del barrido en frecuencia. En la Fig. 15 se representa el esquema de conexionado para al ensayo de barrido.

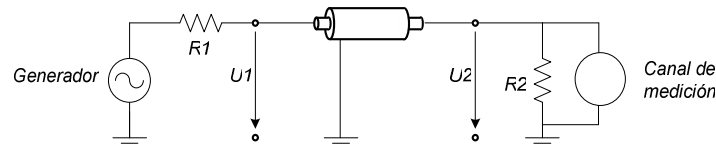


Fig. 15 - Esquema de conexiones para el barrido en frecuencia

En el resultado obtenido de dicho ensayo está incluida la atenuación del cable; pero también la atenuación de los adaptadores confeccionados para evitar las reflexiones en la interface instrumento - cable. Para obtener la respuesta solo en el cable, a la respuesta total se le resta la respuesta debida a los adaptadores (calibración). En la Fig. 16 se representan gráficamente los resultados obtenidos.

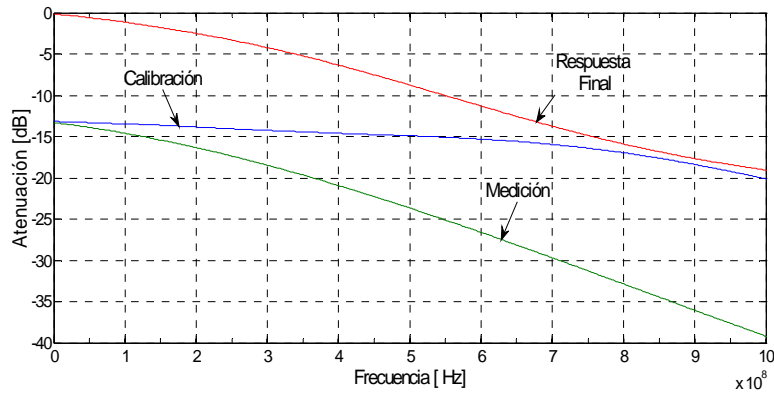


Fig. 16 - Barrido en frecuencia del cable, adaptador y conjunto cable - adaptador

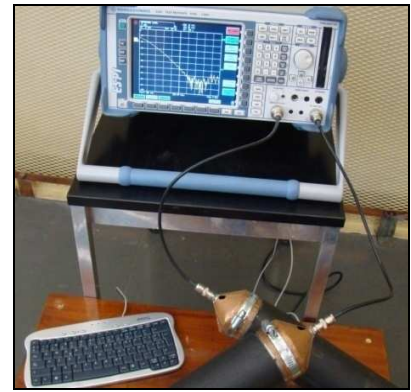


Fig. 17 - Disposición durante la ejecución de los ensayos

Para verificar el significado que tiene la correcta adaptación del cable en el resultado del barrido en frecuencia, se realizó una medición adicional, prescindiendo de los adaptadores. Se interconectaron los extremos del cable directamente con el instrumento; para lo cual se dispuso en cada terminación un pequeño tramo de cable con un conector BNC. En la Fig. 18 se presentan los resultados obtenidos con esta configuración. Como puede observarse los resultados son muy diferentes a los obtenidos con el sistema adaptados (Fig. 16): se registraron oscilaciones de alta frecuencia y se obtuvo una atenuación mucho mayor que en el caso adaptado.

Todos estos efectos son debidos a las sucesivas reflexiones por la falta de adaptación en el sistema. Otro factor que influye en este resultado, es la inductancia que presentan los pequeños tramos de cable que interconectan el cable con los conectores BNC; cuya incidencia es tanto mayor cuanto mayor es la frecuencia.

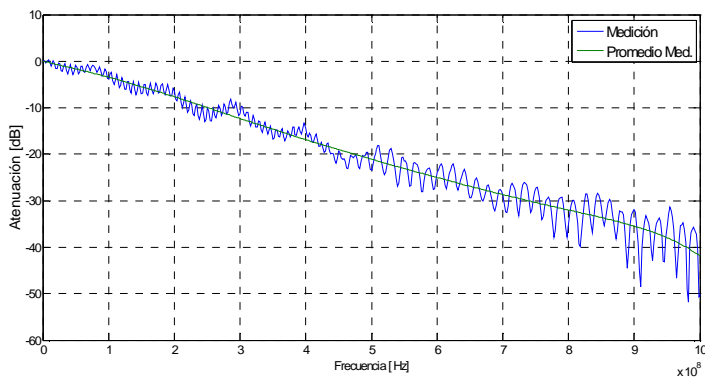


Fig. 18 - Barrido en frecuencia del cable sin adaptación

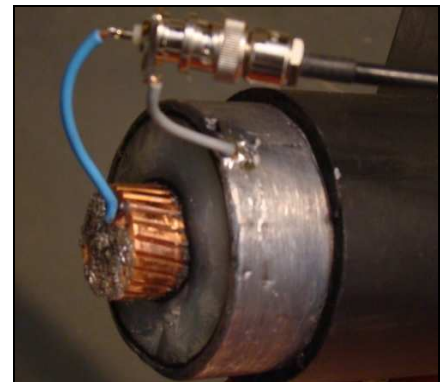


Fig. 19 - Conexiones en el cable

5 CONCLUSIONES

A partir de los ensayos realizados pudieron determinarse los principales parámetros que definen las características de propagación en un cable. Los valores obtenidos resultaron acordes a los esperables para el tipo de cable: velocidad de propagación, permitividad relativa, y tiempo de retardo.

En la determinación del comportamiento en frecuencia se pudo comprobar que las mediciones en el rango de altas frecuencias son muy sensibles a diversos factores de diseño, constructivos y de perturbación externa. Además se demostró que para la obtención de resultados fiables, es fundamental la adaptación del cable, con las impedancias de los instrumentos empleados.

Para la correcta adaptación se desarrolló un conjunto de adaptadores de impedancia para la interface cable - instrumentos. Con ello, se minimizaron las reflexiones de las señales que hubieran incidido en la respuesta final.

El diseño de los adaptadores fue realizado considerando que los resistores que lo conforman tienen asociadas capacidades e inductancias (parásitas) en alta frecuencia. La estimación de estos valores se comprobaron en

un modelo de ATPDraw, cuya respuesta en frecuencia resultó muy similar a la medida en los ensayos. En otras palabras, se pudo confirmar el comportamiento eficientemente en alta frecuencia de los adaptadores. A su vez, los efectos anteriores se manifiestan en una atenuación intrínseca de los adaptadores que es necesario considerar y desafectar de la medición.

Con el cable sin adaptar además de obtener una respuesta muy oscilante (elevada inductancia de las conexiones) se obtiene un nivel muy elevado de atenuación, particularmente para frecuencias superiores a 200 MHz. De esta forma, para medir las descargas parciales de una frecuencia determinada, implicaría inequívocamente sensores e instrumentos con una sensibilidad muy superior.