

## DIAGNOSTICO DE CABLES DE ALTA TENSION (132KV /220KV) ENSAYOS EN VERY LOW FREQUENCY (VLF) – DESCARGAS PARCIALES - TANGENTE DELTA IN - SITU

**PABLO PORFIRI**  
Inducor Ingenieria S.A.  
Argentina

**ROGELIO CORTEGOSO**  
Inducor Ingeniería S.A.  
Argentina

**Resumen** – Las ventajas de la utilización de la tecnología VLF (Very Low Frequency), han posicionado a este método de ensayo, como la alternativa más eficaz para las pruebas de instalación / mantenimiento y diagnóstico de cables subterráneos con aislaciones termo-plásticas. Más de una decena de normativas internacionales vigentes en Europa y USA, amparan y rigen los procedimientos de ensayos en VLF. Por definición de la IEEE, un equipo de ensayo bajo el sistema VLF, será todo aquel que pueda generar una señal de corriente alternada, de una frecuencia del orden de los 0,01Hz a 1Hz.



Se presenta aquí, el primer Sistema Móvil con tecnología VLF (0,1 Hz), para ensayos de tensión aplicada y de diagnóstico por Descargas Parciales / Tangente Delta, para cables de AT y EAT (HV/EHV).

Desarrollado y ensamblado en Argentina, el sistema tiene la capacidad de efectuar ensayos de diagnóstico de estado en cables de AT de hasta 20 km de longitud, (3,75 uf de carga), identificando en forma puntual, los sitios del tendido subterráneo que producen descargas parciales (mapa de descargas).

El nuevo Sistema Móvil, permite realizar tanto la serie de ensayos de tensión aplicada (tensión resistida //Withstand Test), de acuerdo al punto 5.3 VLF testing with sinusoidal waveform; establecidos según IEEE Std 400.3™-2006, como así también, los ensayos de diagnóstico de estado (degradación), acorde a lo establecido en IEEE Std 400.2™-2004.

Entre estos últimos, se encuadran los ensayos de descargas parciales, tanto en forma global, como así también el trazado del “Mapa de Descargas”, y los de Tangente Delta o Factor Disipación.

**Palabras clave:** VLF Very Low Frequency – DP Descargas Parciales - Trazado (mapeo) de DP – Tangente Delta.

### 1 INTRODUCCIÓN

Durante los ensayos de instalación/aceptación, en sistemas subterráneos, la mayoría de las fallas son debidas a una ineficiente ejecución de sus empalmes, y para estos casos, el VLF está demostrando ser un método eficaz, dinámico y seguro para mantener la confianza en los sistemas de distribución de energía.

Sin embargo, mas allá de detectar fallas, en la actualidad, la tendencia mundial está basada en la anticipación temprana de un siniestro eléctrico, mediante la aplicación de técnicas de diagnóstico de cables y sus accesorios, permitiendo controlar desde la instalación de los mismos, el tipo de falla que a futuro tendrán, cuando se constituyan como parte integrante de un tendido subterráneo, permitiendo analizar metro a metro el estado de degradación, ya sea ascendente o estable.

Los avances tecnológicos en materia de diagnóstico de cables subterráneos, y las normativas de aplicación, cedieron un lugar para la creación del primer Sistema Móvil con tecnología VLF (0,1 Hz), para ensayos de tensión aplicada y de diagnóstico por Descargas Parciales / Tangente Delta, en cables de AT y EAT (HV/EHV), denominado **VLF-200 HVCD**. (HIGH VOLTAGE CABLE DIAGNOSTIX).

Desarrollado y ensamblado en Argentina por **INDUCOR INGENIERIA S.A.**, con la combinación de sus socios tecnológicos: HIGH VOLTAGE Inc. (USA), & POWER DIAGNOSTIX SYSTEM (Alemania), el sistema tiene la capacidad de efectuar ensayos de diagnóstico de estado en cables de AT de hasta 20 km de longitud, (3,75 uf de carga), identificando en forma puntual, los sitios del tendido que producen descargas parciales (mapa de descargas).



## 2 GENERALIDADES

Por definición de la IEEE, un equipo de ensayo bajo el sistema VLF, será todo aquel que pueda generar una señal de corriente alternada, de una frecuencia del orden de los 0,01Hz a 1Hz.

El principio de funcionamiento se logra a partir de una corriente continua, la cual luego de ser acondicionada por un sistema electromecánico / electrónico, pasa a formar una alternancia mediante un proceso sistemático de carga y descarga del cable bajo ensayo.

Claro que cargar un cable con corriente continua es muy sencillo y requiere de una fuente de poca potencia, pero el principal problema está en los intervalos de descarga de la gran energía acumulada en dicho cable, según la ecuación:

$$E \text{ (Joules)} = 0.5 \times C \times V^2$$

Esta variable de altas energías en juego, que deben ser disipadas 2 veces por ciclo, ha sido una de las partes más complejas a resolver, especialmente cuando hablamos de altas tensiones (220 kV), y de grandes capacidades, como son los cables de extensas longitudes (hasta 20 km).

Tomando el ejemplo anterior, la energía máxima a disipar en un ciclo completo sería nada menos que de:

$$E = 2 \times 0.5 \times 3,75 \times 10^{-6} \times 220.000^2 = 150 \text{ K Joules.}$$

## 2.1 Innovación del sistema VLF-200 HVCD:

La bondad de un equipo para ensayos en VLF, es la de aproximarse lo mas posible a un ensayo efectuado en corriente alterna a la frecuencia de red, pero la diferencia sustancial radica en la baja potencia que se requiere en modo VLF 0,1 Hz, frente a los de 50 Hz ó 60 Hz. A 50 Hz, un cable de 3,75uf, probado a 220 kV de tensión de prueba, requerirá de 57 MVA de potencia (259 A), mientras que a 0,1 Hz, solo requerirá de 0,52A. (114 KVA). La variable en juego, es la reactancia capacitiva.



## 2.2 Versatilidad del sistema VLF-200 HVCD:

El nuevo Sistema Móvil VLF-200 HVCD, permite realizar tanto la serie de ensayos de tensión aplicada (tensión resistida //Withstand Test), de acuerdo al punto 5.3 *VLF testing with sinusoidal waveform*; establecidos según:

IEEE Std 400.3™-2006

IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment.

Como así también, los ensayos de diagnostico de estado (degradación), acorde a lo establecido en:

IEEE Std 400.2™-2004

IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)

Entre estos últimos, se encuadran los ensayos de descargas parciales, tanto en forma global, como así también el trazado del “Mapa de Descargas”, y los de Tangente Delta o Factor Disipación.

## 2.3 Ensayo de tensión aplicada (Withstand Test)

Los organismos IEEE/EPRI/CEA, y otros entes mundiales de ingeniería y normalización, fijan niveles de pruebas para dieléctricos de cables, de 1,5 a 3 veces la tensión  $U_0$ , durante un mínimo de 15 minutos.

La actualización de la tradicional norma IEC-60840-2004, para ensayos en C.A., dice en su apartado *TEST VOLTAGE*, que el nivel de la tensión de prueba para sistemas de cables nuevos, debe estar entre los  $1,7 U_0$  a  $2 U_0$ , para cables comprendidos entre 30 kV y 150 kV de tensión nominal.

Mientras que para cables de mayores tensiones, la tensión de prueba decrece desde  $1,4 U_0$  para los de (220-230 kV), a  $1,3 U_0$  (275-345 kV),  $1,2 U_0$  para (380-500 KV), y a tan solo  $1U_0$  para los de 500 kV.

Adicionalmente, IEC-62067 especifica ensayos con  $1,7 U_0/1$  hora para todos los tipos de cables mayores a 150 Kv, y permite al usuario y al fabricante, convenir la tensión de prueba y el procedimiento de ensayo.

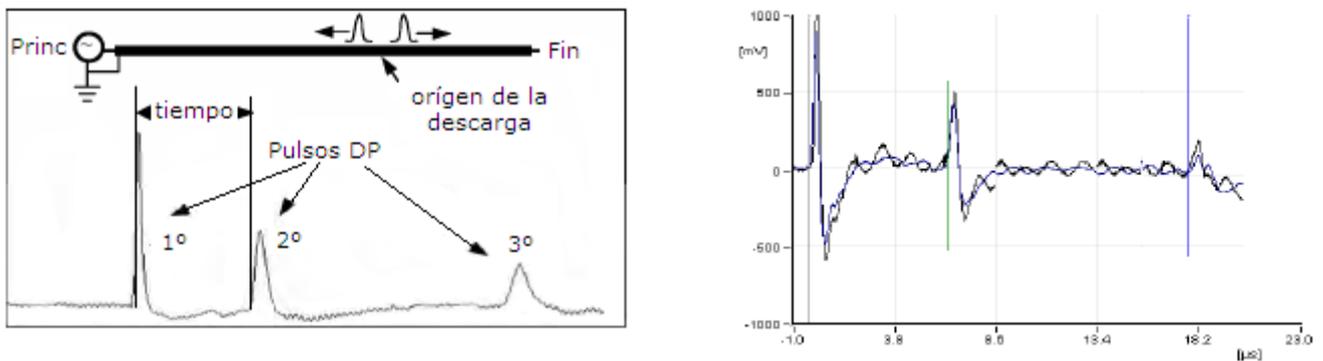
ACORDE A IEC, A MAYOR TENSION NOMINAL DEL SISTEMA DE CABLES A ENSAYAR, MENOR COEFICIENTE DE TENSION DE PRUEBA

El Sistema Móvil **VLF-200 HVCD**, tiene la capacidad de ensayar en corriente alterna, hasta 20km de cables con solo 20 KVA de potencia de red, y con una frecuencia selectable de 0.02 - 0.05 y 0.1 Hz.

### 2.4 Ensayo /mapa de descargas parciales (*Partial Discharge Test & Mapping*)

El nuevo Sistema Móvil **VLF-200 HVCD**, en su modo “DIAGNOSTICO”, mas allá de poder cuantificar un valor “global” de las descargas parciales de un tendido de alta tensión, acorde a IEC-60270, lo cual sería muy poco útil dado que no se podría identificar cual sería el accesorio, empalme, terminal o tramo de cable que las producen en mayor medida, permite también realizar un trazado o mapa de las descargas parciales que posee un sistema de cables instalados, en función a su metraje (mapa pico-coulombs Vs metros).

El principio de medición para el trazado de este mapa, está basado en la REFLECTOMETRIA DE SEÑALES. Una vez que se producen las DP mediante la aplicación de una tensión de prueba VLF, las mismas viajarán hacia ambos extremos del cable; reflejándose en los terminales y produciendo, un trazo típico de tres impulsos por cada evento de descarga.

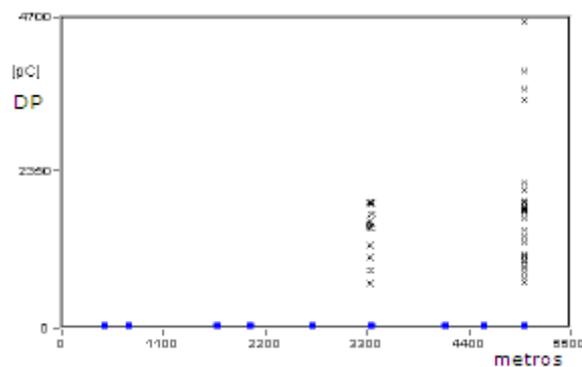


Reflectometría esquemática (derecha), y real (izquierda) de una señal de descargas parciales

En esta traza, el tiempo entre el primer y el segundo impulso, corresponde a la distancia existente entre el origen de la DP (ubicación), y el extremo final del cable; así mismo, el tiempo entre el primer y el tercer impulso, refleja el tiempo en desplazarse dos veces por el cable.

Luego un simple cálculo resuelve la posición (origen) de la descarga, en función a la longitud del cable.

Basado en los resultados de la ubicación, el diagrama de las DP es el mostrado en la figura que detalla todas las actividades de descargas en función a la longitud del cable.



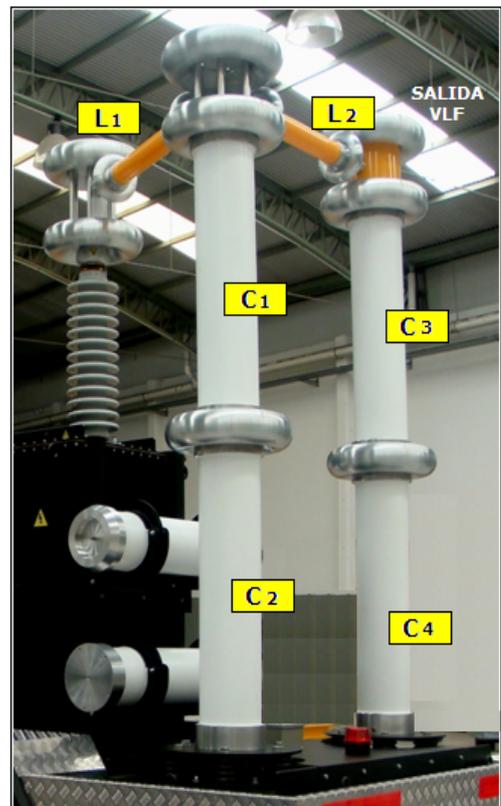
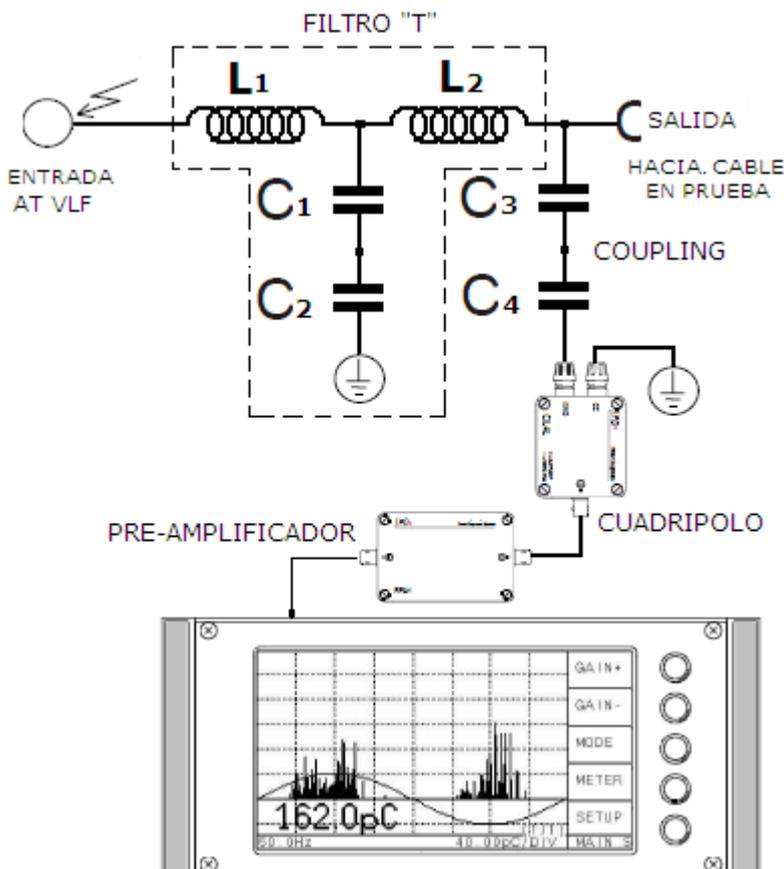
Mapa de descargas parciales versus metros de cable

Comparando este diagrama con el plano de instalación del cable, y con las posiciones de los empalmes existentes (verificadas durante la calibración), se pueden identificar los lugares defectuosos del sistema.



Para eliminar las interferencias de altas frecuencias, provenientes de la fuente de alta tensión tipo VLF y de la red de alimentación, el Sistema Móvil **VLF-200 HVCD**, posee una etapa de filtrado directamente acoplada al circuito de alta tensión.

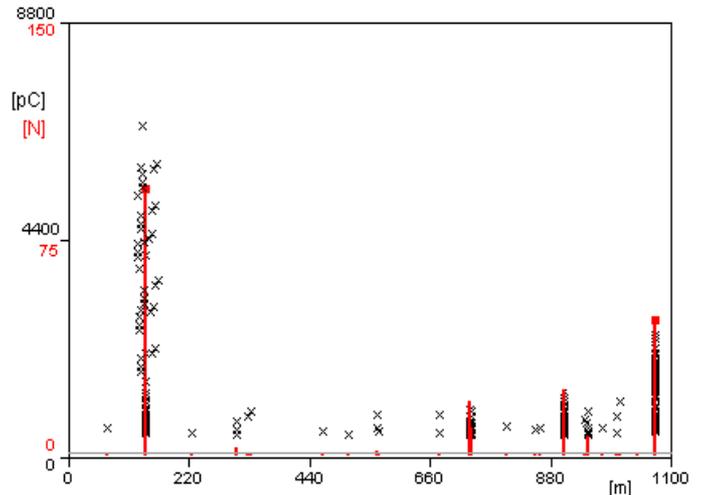
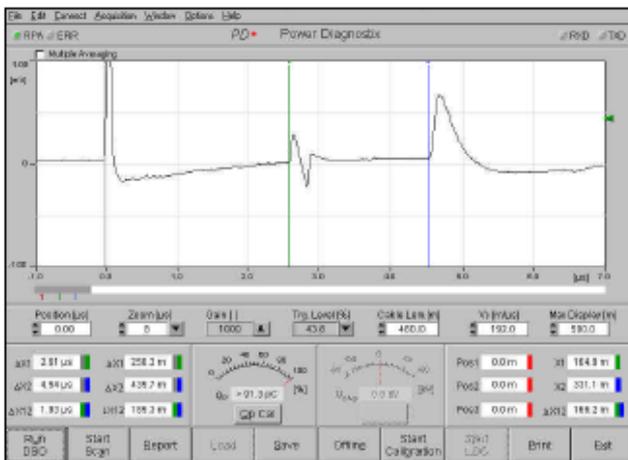
Por medio de un filtro tipo "T", constituido por dos ramas inductivas y una capacitiva, sintonizadas a las frecuencias del orden de los anchos de bandas del sistema de medición de descargas, acordes a IEC-60270, las mediciones se hallan libres de ruidos e interferencias, permitiendo ser mas selectivas.



Esquema de medición de DP en el sistema VLF200-HVCD

De acuerdo a IEC - 60270, el sistema de medición de DP se complementa con una impedancia de transferencia (cuadripolo), y una etapa pre-amplificadora con filtros selectivos de bandas pasantes en el rango de de los 40KHz a 20 MHz.

El software del sistema de medición de DP, permite graficar y mantener en pantalla, todos los eventos capturados en forma simultánea, tanto en reflectometría de las señales (Modo DSO), como en el trazado del mapa de descargas pico Coulombs versus metros. (Modo *Site Locator*).



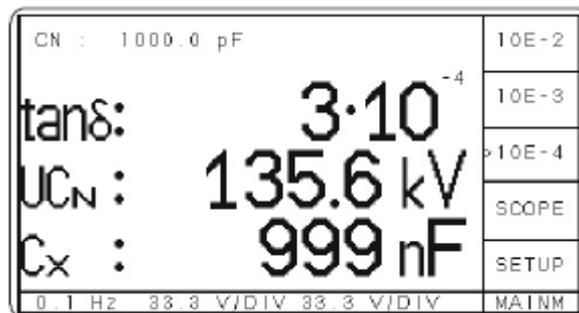
Mapa de descargas parciales versus metros

## 2.5 – Ensayo de tangente delta (*Dissipation Factor*)

El nuevo Sistema Móvil **VLF-200 HVCD**, en su modo “DIAGNOSTICO”, permite también realizar un ensayo de Tangente Delta (Factor de Disipación), con una resolución de  $1 \times 10^{-4}$  acorde a IEEE Std 400.2™-2004.

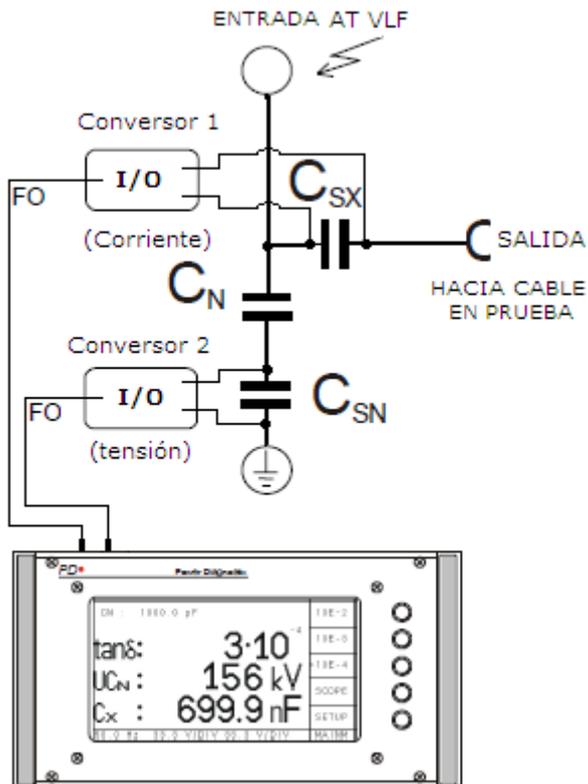
Su pantalla tipo LCD, expone en forma gráfica la formas de ondas de tensión y corriente.

Las variables en pantalla son C: Capacidad; V: Tensión Aplicada, y el  $\cos \phi$  de la muestra.



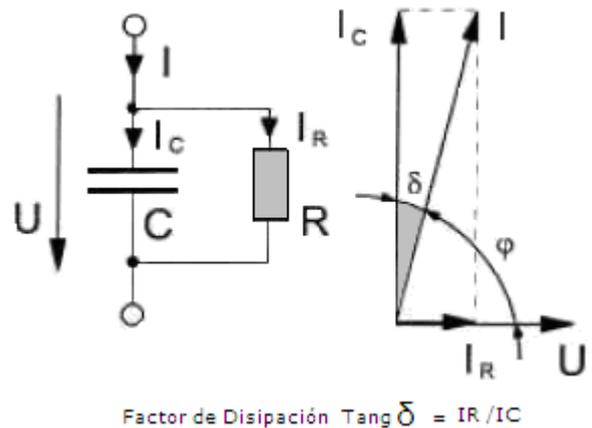
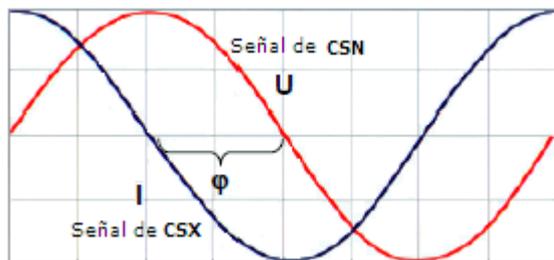
El sistema de medición de Tangente Delta, toma en forma simultánea, dos señales de corrientes, una por medio de un shunt capacitivo en serie con la muestra (**CSX**), y otra por medio de un capacitor de referencia (**CN**), formando un divisor de tensión (**CSN**), en paralelo con la muestra.

Ambas señales son capturadas en forma directa sobre el circuito de alta tensión. Luego, dos conversores I/O, transforman estas señales analógicas en ópticas y las envían hasta el hardware de medición, para ser evaluadas por medio de un microprocesador, obteniéndose finalmente los resultados de capacidad / tangente/  $\cos \phi$ , todos ellos en función a la tensión VLF aplicada.



Esquema de medición de TD en el sistema VLF200-HVCD

Durante el análisis gráfico, el actual desfase angular existente entre las formas de ondas de la tensión y de la corriente, corresponde al ángulo  $\phi$ , situado como complemento de  $\delta$ .



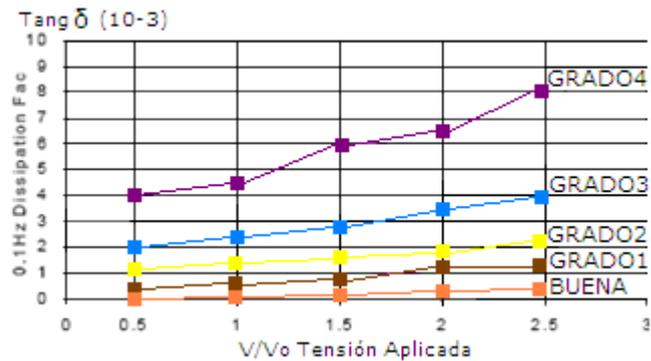
Técnicamente, un sistema aislante es construido con materiales de bajas pérdidas, resultando en una pequeña corriente  $I_r$ , en fase con la tensión aplicada. Esta corriente puede ser interpretada como un resistor  $R$  en paralelo con una capacidad  $C$ .

La diferencia de fase entre la corriente real  $I$ , y la corriente ideal  $I_c$ , se describe como el ángulo  $\delta$ . Dado que  $P = Q - \text{tang } \delta$ , las pérdidas son por lo tanto proporcionales a la  $\text{tang } \delta$ , y dan una expresión de la calidad del material aislante. El ángulo  $\delta$  es descrito como el ángulo de pérdidas, y la tangente  $\delta$  como el factor de pérdidas. Particularmente aplicada a un sistema de cables de AT, la  $\text{tang } \delta$  refiere a la calidad y evolución del material instalado en forma global (sistema único formado por cable /terminales/empalmes). Al no contar con valores previos de tangente delta, que establezcan parámetros iniciales comparativos, (evolución de defectos), el análisis del resultado será tomado en consideración a las siguientes dos variables:

- 1- Comparación de resultados entre las distintas fases de una misma terna.
- 2- Estabilidad del valor de tangente ante la tensión creciente de ensayo.

**Criterio de aceptación:**  
 $T\delta @ 2 U_0 < 1,2 \text{ ‰}$   
 $T\delta @ 2U_0 - T\delta @ U_0 < 0,6 \text{ ‰}$

**Criterio de rechazo:**  
 $T\delta @ 2 U_0 \geq 2,2 \text{ ‰}$   
 $T\delta @ 2U_0 - T\delta @ U_0 \geq 1,0 \text{ ‰}$



Los grados 1 al 4 indican el envejecimiento (*aged condition*) del sistema de cables, en un orden ascendente (grado de deterioro o de de gradación). Luego, un poderoso software permite graficar y mantener en pantalla todas las variables medidas, en tiempo real y en forma simultánea.

### 3 CONCLUSIONES

En la actualidad, la norma IEEE-400.2001 IEEE GUIDE FOR FIELD TESTING AND EVALUATION OF THE INSULATION OF SHIELDED POWER CABLE SYSTEMS cubre los ensayos de sistemas de cables instalados, de clase 5KV a 500 KV en todas sus etapas (instalación – aceptación – mantenimiento). El Sistema Móvil **VLF-200 HVCD**, con tecnología VLF sinusoidal, permite hoy en día la realización de los ensayos de instalación y de diagnóstico de estado de cables subterráneos de AT / EAT, posibilitando mediciones precisas en las mas extensas longitudes de tendidos.

Frente a la necesidad de dejar de lado los ensayos en Corriente Continua, debido a los efectos perjudiciales que esta produce sobre las aislaciones tipo XLPE, la versatilidad del Sistema Móvil **VLF-200 HVCD** frente a los equipos resonantes convencionales, marca una diferencia fundamental tanto en dinamismo como en capacidad de diagnóstico.



### 4 REFERENCIAS:

- IEEE Std400-2001 ENSAYOS EN CAMPO Y EVALUACION DE LA AISLACION DE CABLES DE POTENCIA
- IEEE Std400.2-2004 ENSAYOS EN CAMPO DE CABLES DE POTENCIA APANTALLADOS USANDO VLF.
- IEEE Std 1234-2007 FAULT LOCATING TECHNIQUES ON SHIELDED POWER CABLES SYSTEMS
- Database interna Inducor Ingenieria S.A.

Todas las fotos publicadas pertenecen al Dto. Servicios de Inducor Ingenieria S.A.