

# DIAGNÓSTICO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN AEREAS DE 11.4 HASTA 34.5 KV CON LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO.

Mario Ricardo Cárdenas Barrero  
 Profesional Experto  
 CODENSA S.A. E.S.P.  
 BOGOTA D.C.  
[mcardenas@codensa.com.co](mailto:mcardenas@codensa.com.co)

Miguel Eugenio Garzon  
 Subgerente Redes MT-BT  
 CODENSA S.A. E.S.P.  
 BOGOTA D.C.  
[mgarzon@codensa.com.co](mailto:mgarzon@codensa.com.co)

**Abstract** –La técnica de Ultrasonido propagado en aire y estructuras, la cual capta rangos de frecuencias mayores a los 20.000 Hz, es utilizada para la detección y localización exacta de fallas categorizadas como efecto corona, tracking eléctrico y arco eléctrico, dichas manifestaciones degradan los elementos que componen las redes de distribución de Media y Alta tensión.

El uso de la técnica de Ultrasonido propagado en aire y estructuras, se encuentra generalizada en el diagnóstico de líneas de transmisión y subestaciones de potencia, su aplicación en redes de distribución de 34.500 hasta 11.400 V. ha demostrado que complementaria con la termografía pueden llegar a detectar puntos de falla no localizables a través de la inspección visual en el sistema y disminuir ostensiblemente las fallas no determinadas.

*Palabras Clave* – ultrasonido, arco, corona, tracking, frecuencia, Fourier y onda

## I. INTRODUCCIÓN

El impacto de las fallas, en los indicadores de calidad y la imagen de las compañías eléctricas; son la razón principal para la búsqueda de nuevos modelos, técnicas y tecnologías dentro del Mantenimiento Predictivo que apunten a la identificación temprana de las mismas. Así, la técnica de Ultrasonido propagado en aire y estructuras, la cual capta rangos de frecuencias mayores a los 20.000 Hz, es una poderosa herramienta, hoy por hoy, muy utilizada en la detección temprana y localización exacta de fallas categorizadas como efecto corona, tracking eléctrico y arco eléctrico, manifestaciones éstas que contribuyen en alto grado en la degradación de los elementos que componen las redes de distribución de Media y Alta tensión.

El uso de la técnica de Ultrasonido propagado en aire y estructuras, se ha generalizado en el diagnóstico de líneas de transmisión y

subestaciones de potencia y su aplicación en redes de distribución de 34.500 hasta 11.400 V. ha demostrado que complementaria a la termografía pueden llegar a localizar puntos de falla no identificables a partir de la inspección visual en el sistema y disminuir ostensiblemente las fallas no determinadas.

Dicha técnica ha facilitado la localización de fallas en aislamientos, cables de media tensión, puntos de conexión, equipos de protección y operación con efectos presentes, tales como corona, tracking eléctrico y arco eléctrico, convirtiéndose en herramienta prioritaria, dado su carácter predictivo, detectando fallas en evolución, con un margen de tiempo suficiente para que los expertos procedan a su corrección, minimizando o eliminando el efecto sobre la calidad del servicio a los clientes.

CODENSA SA ESP, en los últimos años ha venido desarrollado la técnica de ultrasonido propagado en aire y estructuras sobre circuitos de media tensión (34.500, 13.200 y 11.400 V), la cual se enfoca en dos tipos de causas de falla, degradación de material y no determinada, las cuales representan un 45% del total de las fallas que se presentan en el sistema de distribución.

En lo transcurrido del 2011, con ésta técnica de Ultrasonido, se fortaleció el análisis predictivo y se localizaron más de 200 puntos de falla ocultas en el sistema, tanto en redes aéreas de distribución como en redes subterráneas, no detectables mediante las tradicionales inspecciones visuales y/o la técnica de termografía, dando como resultado, importantes ahorros, por la no ocurrencia de dichas fallas y la mejora de los indicadores de calidad para los circuitos inspeccionados.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para el OR (Operador de Red), el cambio regulatorio enfocando la calidad del servicio a la energía dejada de suministrar, medida en el indicador ITAD (Índice Trimestral Agrupado de la Discontinuidad) y la optimización de los costos operacionales, han cambiado la forma de ver el mantenimiento enfocándolo en técnicas predictivas no intrusivas.

Adicionalmente, la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) ha venido enfocando sus resoluciones hacia la confiabilidad y mantenibilidad de las instalaciones eléctricas.

Es por éste motivo que los OR (Operadores de Red) han implementado técnicas para ejecutar mantenimientos predictivos con el fin de disminuir costos de los ciclos de cambio y con esto aumentar la vida útil de los materiales. Técnicas que han tomado fuerza, haciéndose indispensables dentro del mantenimiento, al observarse que los actuales ciclos de mantenimientos, últimamente enfocados en estándares alineados con la optimización de costos y la maximización de tiempos entre intervenciones, están ocasionando que se presenten fallas más frecuentemente y de mayor duración. Adicional a esto, los productos instalados sobre la red, igualmente, han sido sometidos a rigurosos procesos de optimización en la manufactura, trayendo como consecuencia menores prestaciones mecánicas y eléctricas, generando envejecimientos prematuros, rotura y en general un sinnúmero de defectos, que aunados a la falta de información en los OR sobre fecha de instalación y hoja de vida de los equipos, refuerzan las prácticas de mantenimiento, enfocadas en la predicción.

## III. ESTADO DEL ARTE DEL ULTRASONIDO

Ultrasonido es una onda acústica o sonora cuya frecuencia está por encima del espectro audible del oído humano (aproximadamente 20.000 Hz). Las ventajas del ultrasonido:

- ✓ Direccional.
- ✓ Localizable.
- ✓ Utilización en todos los ambientes.
- ✓ Indicación de las fallas incipientes.
- ✓ Soporte para otras tecnologías.

Los instrumentos que captan éste nivel de frecuencia de ultrasonido son sensibles a los sonidos que no están incluidos dentro del rango auditivo humano. Un detector ultrasónico convierte las señales de ultrasonido al rango audible humano.

El mejor oído humano escucha sonidos en el rango de 20Hz a 20.000Hz (20 kHz.) (Tabla.3). El rango de la mayoría de los equipos que detectan ultrasonido, comienza en 20kHz hasta 100 kHz.



Figura 1. Rangos del Sonido

Teniendo en cuenta la figura anterior se indica en la Tabla N.1 las diferencias técnicas de un sonido audible frente a un Ultrasonido.

SONIDO AUDIBLE	SONIDO ULTRASONIDO
Frecuencia de 20 Hz - 20 KHz.	Frecuencia de 20KHz - 100KHz
Longitud de Onda ancha	Longitud de Onda corta
1.09 cm hasta 17.06 m	0.32 cm hasta 1.6 cm
Multidireccional	Unidireccional

Tabla.1 Rangos de Frecuencia Audible y Ultrasonido

En las redes eléctricas aéreas de media tensión se presentan fenómenos eléctricos y electromecánicos, que bajo las habituales inspecciones visuales, llevadas a cabo por personal altamente calificado en el mantenimiento, no son perceptibles a los sentidos del ser humano. Dichas fallas no son localizadas, quedando latentes, haciendo necesaria la utilización de tecnologías, técnicas y herramientas que de distinta forma nos ayuden a localizar, prevenir y corregir fallas escondidas en el sistema eléctrico. El Ultrasonido propagado en

aire y estructuras, es una de ellas, pudiendo localizar los siguientes fenómenos eléctricos:

**Efecto Corona:** es un fenómeno eléctrico que se produce en los conductores de las líneas de alta y media tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso a su alrededor. El efecto corona es causado por la ionización del aire circundante al conductor debido a la colisión de electrones libres que se escapan del sistema, o por adición de electrones al pasar por una órbita de algún átomo capaz de contener esa energía. En el momento que las moléculas de aire se ionizan, éstas son capaces de conducir la corriente eléctrica y parte de los electrones que circulan por la línea pasan a circular por el aire; tal circulación producirá un aro de un color rojizo para niveles bajos de temperatura, o azulado para niveles altos.

El ruido provocado por el efecto corona consiste en un zumbido de baja frecuencia (básicamente de 100 Hz), provocado por el movimiento de los iones y un chisporroteo producido por las descargas eléctricas (entre 0,4 y 16 kHz). Son ruidos de pequeña intensidad que en muchos casos apenas son perceptibles; únicamente cuando el efecto corona sea elevado se percibirán en la proximidad inmediata de las líneas de alta y media tensión. La pérdida de electrones puede ser causada por contaminación, degradación, mala instalación o humedad anormal. La figura 2, muestra el comportamiento que tiene el efecto Corona en el diagrama de transformada rápida de Fourier vs el Tiempo.

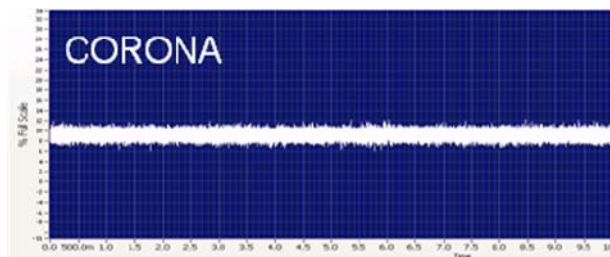


Figura 2. Efecto Corona diagrama de amplitud de la energía acústica vs tiempo

Para el caso de la grafica de frecuencia vs Decibeles, se puede identificar el comportamiento de la onda, con picos de frecuencia cada 60 Hz, con este método se pueden diferenciar los sonidos eléctricos de los mecánicos.

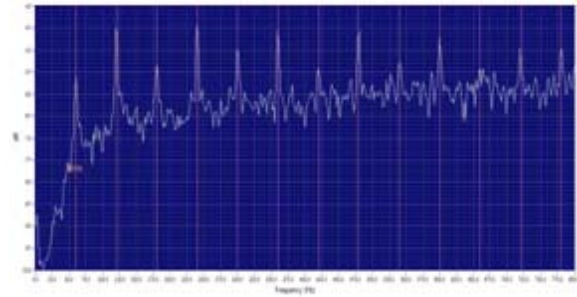


Figura 3. Efecto Corona diagrama de Frecuencia vs Decibeles

**Tracking Eléctrico:** Cuando el material ha sido deteriorado por el efecto Corona se da un fenómeno conocido como Tracking, que es el camino eléctrico superficial por donde aparecen arborescencias eléctricas bidimensionales, cuando la superficie de aislantes está sometida a un gran estrés eléctrico, o contaminación por polvo, sales minerales o humedad.

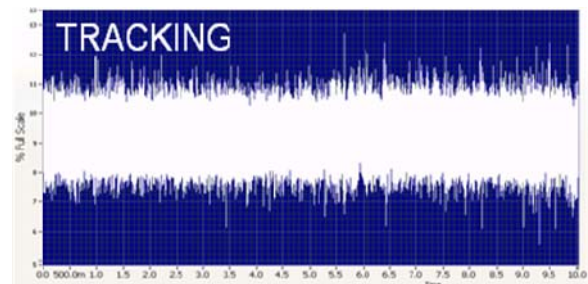


Figura 3. Efecto Tracking diagrama de amplitud de la energía acústica vs tiempo

**Arco eléctrico:** Se forma entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial y colocados en el seno de una atmósfera gaseosa enrarecida, normalmente a baja presión, o al aire libre, forma entre ellos una descarga luminosa similar a una llama. Durante el tiempo de la descarga se produce una luminosidad muy intensa y un gran desprendimiento de calor. Ambos fenómenos, en caso de ser accidentales, pueden ser sumamente destructivos, como ocurre con la perforación de aisladores o de los aislantes de conductores y otros elementos eléctricos o electrónicos.

Se suele llamar descarga de arco al tipo de conducción eléctrica que se establece en gases y da lugar a corrientes muy altas, desde amperios a miles de amperios. Una descarga de arco es en esencia un corto circuito y el mecanismo de ionización del aire es similar al de la descarga Corona.

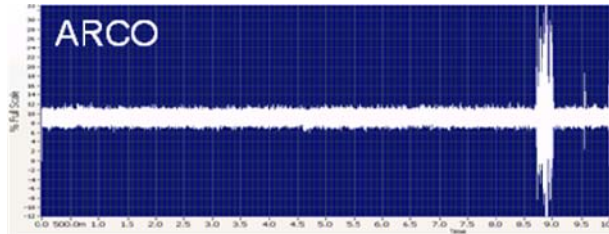


Figura 3. Efecto Arco Eléctrico diagrama de amplitud de la energía acústica vs tiempo

En las redes de distribución de media tensión se encuentran aisladores de suspensión y retención, en tres (3) tipos de material: porcelana, vidrio y polímero. Estos materiales evidencian los diferentes fenómenos detectables con ultrasonido. A continuación una muestra de las características observadas bajo cada tipo de fenómeno, en aisladores tipo porcelana, solo a modo de ejemplo, teniendo en cuenta que la técnica permite la detección en los diferentes materiales.

A. Diferencia entre el Ultrasonido propagado en aire y estructuras y la termografía

Las técnicas predictivas son complementarias, adicional, las más conocidas en el mantenimiento predictivo son:

- ✓ Inspección visual
- ✓ Termografía
- ✓ Ultrasonido

A continuación se presenta una tabla de diferencias entre la técnica de Ultrasonido y Termografía.

ULTRASONIDO	TERMOGRAFIA
Detecta efecto corona, descarga parcial y arco (Fenómenos externos)	$\Delta T$ - Puntos caliente - No Corona! (Fenómenos internos)
Depende de la tensión únicamente (No de la carga de la línea)	Dependiente de la corriente (requiere carga elevada)
Chequeos a cualquier hora y en cualquier tipo de ambiente (la humedad es una ventaja)	Radiación solar y ambiente caliente representan un problema
La detección ocurre en cualquier etapa de la degradación (p.ej. Puesta en servicio)	Detección normalmente se hace en un estado avanzado de degradación

Tabla.2 Diferencias Termografía y Ultrasonido

La implementación de la técnica de ultrasonido en el mantenimiento de las redes eléctricas aéreas de media tensión, como actividad complementaria a la técnica de termografía, tiene como fin realizar un plan de mantenimiento predictivo para identificar las fallas presentes y latentes en un sistema de distribución.

IV. PRUEBAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN (34.500 HASTA 11.400 V)

Fallas en Aisladores de 34.500 -13.200 y 11.400 V

a. Efecto Corona en Aisladores:

Teniendo en cuenta que el efecto corona en algunos casos es incipiente a los equipos, éste es el primer paso en la de degradación de un material eléctrico como resultado de las inspecciones realizadas; se ha encontrado que éste puede llevar a una coloración blanca del aislador, perdiendo su capa de porcelana y de aquí evolucionar rápidamente a un efecto tracking. Se han encontrado puntos defectuosos en redes de 11.400 y 13.200 V. Este modo de falla se considera programable.



Fotografía 1. Aislador con efecto corona

b. Tracking eléctrico en Aisladores

El tracking eléctrico que se presenta en los aisladores de porcelana es producido por los óxidos, resultado de la ionización del aire al combinarse con humedad y con contaminantes acumulados sobre los aisladores, lo que produce ácido nítrico, el cual causa la corrosión de dichos elementos propiciando la aparición de descargas superficiales sobre ellos. Cuando éste fenómeno ha producido un daño avanzado sobre el aislador se denomina "bad tracking".



Fotografía 2. Aislador con Tracking

c. Arco eléctrico en Aisladores

El efecto de tipo arco eléctrico sobre los aisladores de porcelana se origina cuando las condiciones ambientales son propicias y una vez el gradiente eléctrico supera la rigidez dieléctrica del aire, produciéndose un paso a tierra abrupto, normalmente acompañado de calor intenso y sonido. Este tipo de eventos se pueden detectar con el equipo de ultrasonido encontrando los siguientes elementos fallados.



Fotografía 3. Aislador con Descarga tipo arco



Fotografía 4. Aislador con Descarga tipo arco

A. Fallas en Conductor Semiaislado de 34.500 -13.200 y 11.400 V

En las redes de distribución de media tensión se encuentran conductores con aislamientos menores a los niveles de tensión de operación de la red (semi-aislados o ecológicos), estos materiales presentan un fenómeno detectable con ultrasonido, como es el tracking eléctrico. A continuación se indican las características de éste fenómeno.

a. Tracking eléctrico en cable semiaislado o ecológico



Fotografía 5. Cable Semi-aislado con Tracking

En la fotografía N°5, se muestra el impacto que tiene sobre el aislamiento los amarres metálicos y el deterioro de los hilos del conductor.



Fotografía 5. Cable Semi-aislado con Tracking

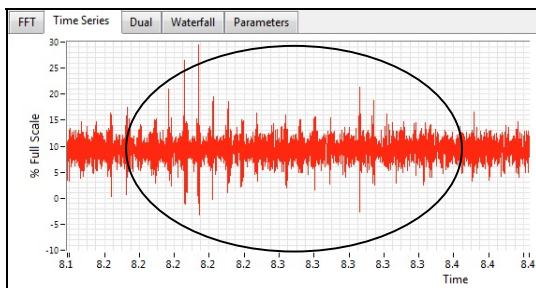
b. Fallas en Cortacircuitos y Descargadores de Sobretensión de 34.500 -13.200 y 11.400 V

Los equipos de protección en los sistemas de distribución de 34.500 hasta 11.400 V, pueden ser las fallas ocultas de mayor frecuencia y más alto impacto en los indicadores de calidad del servicio; localizar por medio de la técnica de Ultrasonido elementos como descargadores de sobretensión y

cortacircuitos con pérdida de aislamiento o falla puede ser la mejor herramienta para la disminución ostensible de las fallas no determinadas en un sistema.

A continuación se presentan algunos ejemplos de localización y detección temprana de fallas en equipos de protección.

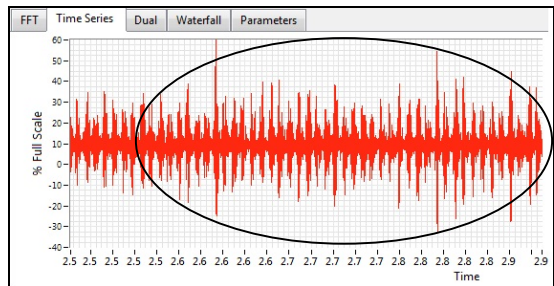
- a. Cortacircuitos contaminadas o con señal de descarga.



Fotografía 6. Tracking eléctrico en Cortacircuitos de 100 A

- b. Descargadores de sobretensión contaminadas o con señal de descarga

Para el caso de los descargadores de sobretensión, se tiene en cuenta que las redes tienen dos tipos de materiales constructivos, Oxido de Zinc y Carburo de silicio. Se ha detectado que algunos aunque se encuentran en circuito abierto o cortocircuito, no expulsan su válvula de sobrepresión, lo que hace que se conviertan en fallas ocultas en el sistema. Una herramienta para la detección de este tipo de fallas es el Ultrasonido a continuación se muestra una imagen de un elemento fallado.



Fotografía 7. Tracking eléctrico en Descargador de Sobretensión

Como metodología de verificación de la eficacia de la localización de equipos con aislamiento defectuoso, se realizó una prueba a 45 descargadores de sobretensión de 15 kV, como resultado se encontraron el 82% de los equipos revisados con falla de circuito abierto o cortocircuito. A continuación se presenta el protocolo de la prueba que se realiza para ver el comportamiento de los descargadores de sobretensión de 15 KV:

### Metodología de la 1. Prueba

Se realiza la conexión del Descargador de sobretensión



2. Se localiza la perilla de tensión al máximo, esto implica que el equipo aplique una tensión de 15.000 V durante un tiempo determinado.



3. Luego de aplicar la tensión se toman los siguientes datos:

Tensión AC en el Visor. La tensión debe estar igual o mayor a la tensión Nominal del Descargador. Corriente  $\mu\text{A}$ , Debe existir un paso de corriente  $>0$  y menor a  $25 \mu\text{A}$ . Si el descargador presenta una tensión  $>$  a su tensión nominal pero la corriente es cero, este se encuentra en circuito abierto.

Si el equipo aprueba, pasa a la 2 prueba.

#### Metodología de la 2. Prueba

1. Se da inicio a la prueba, con el botón de aplicación y se va aumentando el nivel de tensión con la perilla hasta llegar al Voltaje MCOV del equipo, esto implica que el equipo aplique una tensión de 7.600 hasta 10.200 V durante un tiempo determinado.



3. Luego de aplicar la tensión se toman los siguientes datos:

a. Tensión AC en el Visor. La tensión debe estar igual a la Tensión máxima de operación continua (MCOV) del Descargador.

b. Corriente  $\mu\text{A}$ , Debe existir un paso de corriente entre 0 y menor a  $10 \mu\text{A}$ . Si el descargador presenta una corriente  $>$  a la definida este conduce en condiciones normales de operación.

#### V. COSTOS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO VS COSTOS DE FALLA, ASOCIADOS A PUNTOS DETECTABLES.

Los costos asociados a la detección y posterior mantenimiento a puntos localizados con la técnica de Ultrasonido propagado en aire y estructuras, ha demostrado que la relación costo beneficio puede llegar a ser el orden de 1:4 veces más económica, que esperar que se presente una falla.

Durante el año 2011 se realizo el levantamiento de aproximadamente 8.000 Km de red de media tensión de circuitos de 34.500, 13.200 y 11.400 V. como resultado de las inspecciones se han localizado aproximadamente 980 puntos con Ultrasonido, a continuación se presenta un análisis de 20 Circuitos con un total de 353 puntos de falla localizados.

Elemento Fallado	Cantidad
Aislador de Pin	163
Aislador tipo tensor	9
Aisladores de Retención	93
CONEXIONES SALIDA TRAF0 (X,Y,Z)	2
Cortacircuitos	37
SALIDA TRAF0 (X,Y,Z)	3
Seccionador	2
DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN	42
EMPALME AEREO	2
<b>Total general</b>	<b>353</b>

Tabla 3. Análisis de tipos de fallas del ejemplo.

Esta herramienta ha permitido focalizar el mantenimiento de las redes de media tensión (34.500, 13.200 y 11.400 V) aéreas y subterráneas, complementándose con la técnica de termografía, a continuación se presenta la tabla de costos de mantenimiento preventivo vs correctivo con base en datos obtenidos del RCM (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad).

EFECTOS DE LA FALLA	T extremo	EDS (\$)		Frecuencia anual	Costo X Falla (MO-MAT-EDS)	COSTO MTO Correctivo X Falla (20 Circ.)	COSTO Anual X Mto Preventivo
		Extremo					
Aislador contaminado por polución	5.00	\$ 1,740,791		193	\$ 4,030,549	\$ 777,896,020	\$ 156,947,128
Aislador de pin roto debido descarga	5.00	\$ 1,740,791		10	\$ 3,933,139	\$ 39,331,393	\$ 8,013,776
Amarre suelto por instalación fuera de	3.00	\$ 1,102,501		63	\$ 1,753,432	\$ 110,466,231	\$ 50,486,786
Conductor desnudo roto por corrosión	3.00	\$ 1,102,501		2	\$ 41,235,552	\$ 82,471,103	\$ 12,452,331
Descargador en mal estado conduciendo	3.00	\$ 1,102,501		42	\$ 4,229,819	\$ 177,652,393	\$ 50,050,373
Cortacircuito contaminado por	4.00	\$ 1,421,646		48	\$ 3,276,544	\$ 156,889,106	\$ 71,780,395
						\$ 1,344,706,247	\$ 349,730,788

Tabla 4. Análisis de costos de fallas del ejemplo.

#### IV. CONCLUSIONES

La implementación de la técnica de Ultrasonido propagado en aire y en estructuras, ha permitido localizar fallas que antes eran ocultas con la inspección visual y la termografía.

La experiencia alcanzada durante los últimos tres años, junto con los casos evidenciados en el periodo actual, soportan la importancia de las técnicas predictivas, como ejes de actuación dentro de los planes de mantenimiento, disminuyendo los daños y su impacto en la calidad del servicio y por supuesto en el cliente.

Las técnicas visuales, de termografía y de ultrasonido, fundamentales dentro del mantenimiento, tienen que verse como complementarias y absolutamente necesarias para determinar la condición de la red y su requerimiento de corto y mediano plazo.

La implementación masiva de las técnicas de termovisión y ultrasonido, dentro de los programas de mantenimiento, facilita la detección temprana de fallas ocultas, indetectables por métodos tradicionales, minimizando el efecto de los daños posteriores, como fallas a tierra, pases abiertos, aisladores y descargadores pasados, empalmes, etc, con fuerte impacto en tiempo y recurso humano para su ubicación.

La técnica de ultrasonido permite evidenciar defectos en los distintos elementos componentes de la red, producto de prácticas indebidas de mantenimiento y/u obras en redes, con terminales y empalmes mal elaborados, amarres efectuados con materiales inapropiados, generando nivel de

concentración de campo eléctrico que finalmente los llevan a fallar. Esto a permitido, iniciar rigurosos planes de capacitación y de re inducción al personal técnico encargado de estos ejercicios, aumentando sus competencias técnicas y por ende, disminuyendo el riesgo de daños prematuros en redes nuevas y/o posterior a algún tipo de mantenimiento.

El impacto económico del uso de técnicas predictivas es evidente en tiempo y en costos, por lo que debe masificarse a tal punto, que sea el eje de actuación de los programas de mantenimiento en las operadoras de red.

Las técnicas predictivas, en especial el ultrasonido y la termovisión deben formar parte de los programas de recepción de toda obra en redes de MT.

La totalidad de los Descargadores de Sobretensión a los que se realizaron pruebas en terreno se encontraba el desconectador de puesta a tierra sin operación. Podemos concluir que la inspección visual de estos equipos no puede identificar cuales se encuentran en Circuito Abierto o están conduciendo corrientes > a 50  $\mu$ A, esto implica que algunas fallas transitorias o francas sobre los Circuitos pueden estar siendo causadas por estos equipos.

#### Bibliografía

- [1] ANDRADE, Marcos, LIPTCHING Ariel GOMEZ, María, Detección de Efecto Corona en Aislamientos de Media y Alta Tensión. Congreso Uruguayo de Mantenimiento, Montevideo, 2005.  
 [2] LEDESMA, Pablo, El efecto corona, Universidad Carlos III de Madrid

#### NOTA

- Mario Ricardo Cárdenas Barrero  
 Teléfono 6794616 - 6016060 - 3152619585  
 Dirección del autor(es)  
 a. Avenida Calle 22 N°96-60  
 E. mail: [mcardenas@codensa.com.co](mailto:mcardenas@codensa.com.co)
- Miguel Eugenio Garzón  
 Teléfono 6016060  
 Dirección del autor(es)  
 a. Calle 93 N° 13ª-60 Oficinas CODENSA  
 E. mail: [mgarzon@codensa.com.co](mailto:mgarzon@codensa.com.co)