

► Onda coseno rectangular

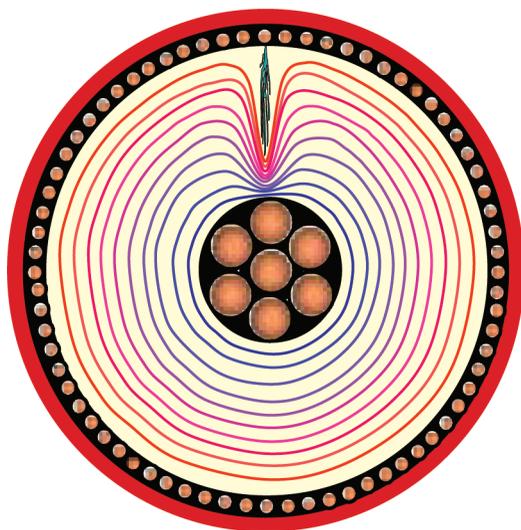
La dependencia de la energía eléctrica exige una gran calidad en el suministro, para ello se debe asegurar el abastecimiento de la red de distribución y transporte. Evaluar un cable colabora con esta tarea: por un lado, reduce los daños producidos por las variaciones de tensión y corrientes de cortocircuito ocasionados por una avería no deseada del cable durante su servicio; y por otro, una prueba de mantenimiento preventivo del cable favorece una mejor administración de los recursos existentes.

Corriente continua

La prueba de cables de media y alta tensión estaba tradicionalmente limitada a la prueba con corriente

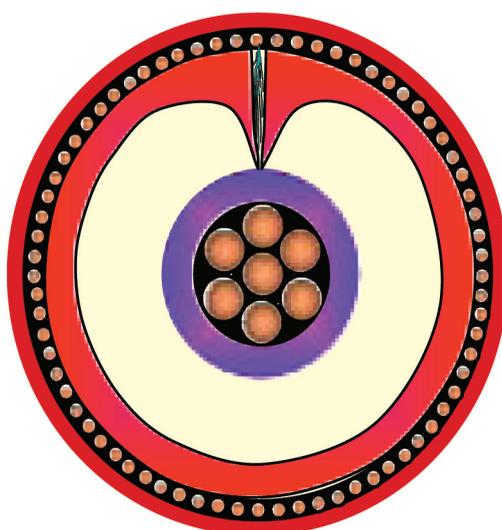
continua. Esta tecnología fue efectiva para cables de papel-aceite (PILC), pero se ha demostrado que puede ser inefectiva, e incluso dañina, para cables de aislamiento polimérico (XLPE –EPR).

- » El alto valor de tensión necesario para la prueba puede causar daños al cable y acelerar su envejecimiento en determinados segmentos del aislamiento.
- » El largo periodo de exposición a los altos valores de tensión de corriente continua genera cargas espaciales residuales, las cuales se pueden considerar como componentes de RC con una constante de tiempo de varias horas e incluso días. Estas cargas espaciales desaparecen muy lentamente, interactúan con los



Cargas residuales antes de la prueba.

Figura 1



Cargas residuales después de la prueba: disminución efectiva de la sección del aislamiento del cable.

campos eléctricos de la tensión de servicio después de la puesta en servicio del cable, provocando una avería disruptiva no controlada.

- » Otro problema es el uso en instalaciones con hexafluoruro de azufre (SF₆). Aquí la corriente continua causa cargas estáticas en el polvo y en las partículas existentes dentro de los sistemas SF₆, removiéndolas y asentándose estas generalmente en el fondo, causando debilidad dieléctrica del gas aislante.

Corriente alterna a 50 Hz

La corriente alterna para cables poliméricos es la prueba más efectiva debido a su cambio de polaridad, lo cual impide la creación de cargas espaciales dentro del aislamiento.

La prueba con corriente alterna a frecuencia de la red es relativamente fácil de efectuar por medio del uso de transformadores, pero la gran pérdida reactiva del cable obliga a diseñar sistemas de enorme peso, tamaño y consumo de energía. Por lo tanto, la movilidad del sistema en la mayoría de los casos está limitada, y requiere del uso de camiones y de espacios abiertos para tensiones altas.

La potencia requerida para probar un cable de 12-20 kV con 2 μF de capacitancia y una tensión de prueba de corriente alterna de 3 U_o es de aproximadamente 1 MVA.

Basándonos en la ecuación para calcular la potencia de un transformador para un sistema de prueba de corriente alterna que tenga la capacidad para probar un cable de 2μF-132 kV, tenemos:

$$S = VI = 2 \pi fCV^2 * 10^{-12}$$

S: potencia del transformador

V: U_o máxima

I: Corriente en amperes

f: frecuencia de la red hertz

$$S = 2 \pi * 50 \text{ Hz} * 2 \mu\text{F} * 190 \text{ kV}^2 * 10^{-12} = 22,68 \text{ MVA}$$

Corriente alterna a frecuencia variable

Los niveles de tensión y de frecuencia usados son comparables a los de la prueba de corriente alterna a 50 Hz, trabaja a frecuencias que varían de 30 a 300 Hz. A frecuencias superiores a 300 Hz, causan pérdidas reactivas muy grandes que producen un sobrecalentamiento de los componentes del sistema.

La tecnología de resonancia recicla una parte importante de la energía, por lo tanto reduce el consumo total en comparación con el ensayo a 50 Hz, aunque este sigue siendo alto. Sumando a su vez las enormes dimensiones y peso, se hace difícil realizar la prueba de resonancia en cables mixtos. El precio del ensayo es demasiado alto por el tiempo, por los recursos humanos, por los medios usados para su transporte y por el grupo eléctrico necesario para la realización del ensayo.

La potencia requerida para probar un cable de 132 kV con 2,5 μF de capacidad a 2,5 U_o de corriente alterna es aproximadamente 14,3 MVA

Corriente alterna a OWTS

Disparos de ondas de corriente alterna a frecuencias resonantes de 20 a 500 Hz. EL cable se carga hasta la tensión requerida, y luego se coloca en paralelo con una bobina de valor fijo, produciendo una onda oscilante amortiguada en función de la capacidad del cable y del estado de su aislamiento.

Este tipo de ensayo no ha sido utilizado por la falta de equipos para su realización en campo, pero actualmente ya existen estos equipos, los cuales están siendo estudiados muy de cerca por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE).

Tienen la ventaja de ser equipos muy ligeros, de tamaño medio y de poco consumo (600 W como máximo).

Corriente alterna VLF 0,1 Hz

El ensayo con corriente alterna a 0,1 Hz, denominado "VLF" (por sus siglas en inglés, *Very Low Frequency*, 'muy

baja frecuencia'), evita la polarización de los aislamientos poliméricos y, por tanto, las cargas espaciales que se formen en este. Otra razón importante es la reducción de tamaño, peso y de su potencia de consumo, lo que hace que la realización del ensayo en campo sea muy fácil y económica.

Basándonos en la ecuación para calcular la potencia de un transformador para un sistema de prueba de corriente alterna que tenga la capacidad para probar un cable de $2\mu\text{F}$ -132 kV, tenemos:

$$S = 2\pi * 0,1 \text{ Hz} * 2\mu\text{F} * 190 \text{ kV}^2 * 10 * \text{E-12} = 0,04536 \text{ MVA} \\ = 45,36 \text{ kVA}$$

El único requisito necesario para cumplir este ensayo es que hablemos de corriente alterna y a una frecuencia fija de 0,1 Hz. Su frecuencia debe ser independiente de la capacidad del cable.

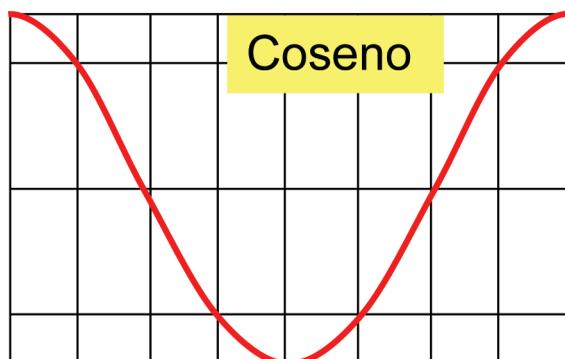
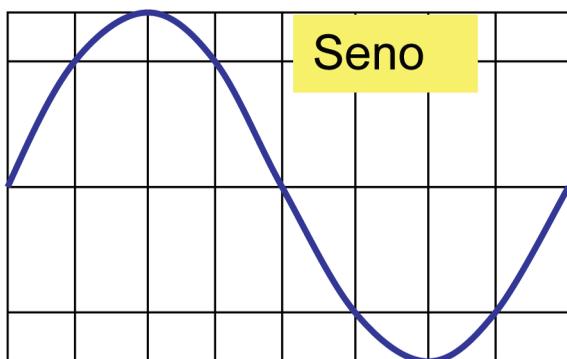
Las normas internacionales IEEE 440.2 e IEC 60060-3 y las normas alemanas VDE 0276-620 y VDE 0276-621 (HD 0620/0621), recogen las siguientes forma de onda VLF:

- » VLF con forma coseno rectangular
- » VLF con forma senoidal

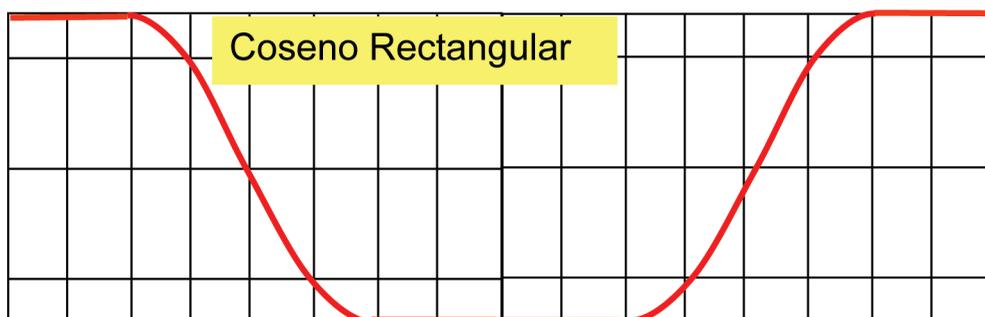
¿Cómo se produce una onda cosenoidal rectangular?

El sistema que genera esta forma de onda está compuesto esencialmente por una fuente de alta tensión de corriente continua, un convertidor de corriente continua a alterna (VLF). El convertidor consiste en una bobina de alta tensión y un rotor rectificador de diodos, el cual cambia la polaridad de la tensión del cable ensayado cada 5 segundos, produciendo así la onda de corriente alterna a 0,1 Hz. El circuito resonante, formado por la bobina de alta tensión y un condensador en paralelo con la capacidad del cable, asegura el cambio de esta polaridad sinusoidal.

Figura 2



Cosenoidal: una onda seno que comienza en 90 o 270°



Coseno rectangular: onda coseno con pequeño componente de corriente continua

El uso de un circuito resonante para cambiar la polaridad de la tensión reutiliza la energía almacenada en el cable. Solo las pérdidas por fugas en el aislamiento hacen que el cable deba alimentarse durante los cambios de la polaridad.

En todo ensayo se intenta conseguir siempre que la prueba sea lo más fiel posible a las condiciones de trabajo del objeto a probar. En este caso, estamos hablando de un cable que trabaja con tensión a corriente alterna senoidal a 50 Hz.

- » Como sabemos, una onda senoidal y cosenoidal es indiferente para el cable eléctrico, solo implica un diferente ángulo de fase inicial (-90° o 270°).
- » Hemos visto que a 50 Hz no es prácticamente posible ensayar cables, por lo que recurrimos a una frecuencia de 0,1 Hz.
- » También es apreciable que una onda a 50 Hz somete al cable a su tensión de pico más veces que 0,1 Hz:
 - 50 Hz: 100 veces por segundo, 360.000 veces por hora.
 - 0,1 Hz: 0,2 veces por segundo, 720 veces por hora.

Pero en verdad, lo que buscamos es una forma de onda que produzca la rotura en el punto débil o crítico

del cable, sin causar daños adicionales. Debido a los estudios realizados, se ha comprobado que los fallos en el cable se producen en los cambios de polaridad, especialmente del positivo al negativo.

¿Cómo podemos simular lo más fielmente posible la onda de la red?

Por ello hemos creado la "onda corriente alterna coseno rectangular", aunque sería más fácil hacer una onda sinusoidal a 0,1 Hz, pero nuestra intención es siempre asemejarnos lo máximo posible a la onda de la red.

El cambio de polaridad con la onda corriente alterna coseno rectangular, que es la principal razón del ensayo con corriente alterna, es el mismo que el ocurrido a la frecuencia de 50 Hz de la red. Para que la onda se parezca lo máximo posible a la de la red, se utiliza una onda de subida y bajada exactamente igual a 50 Hz, pero una vez alcanzada la cresta, se alarga el tiempo en 5 segundos; de esta manera se ha conseguido un ensayo similar a los 50 Hz pero con las ventajas de 0,1 Hz.

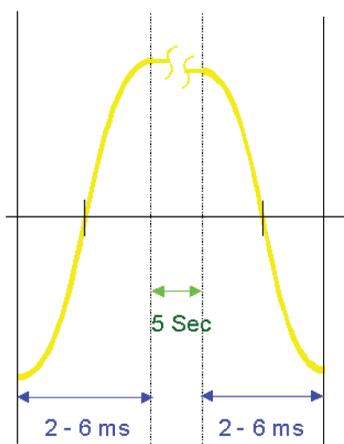


Figura 3

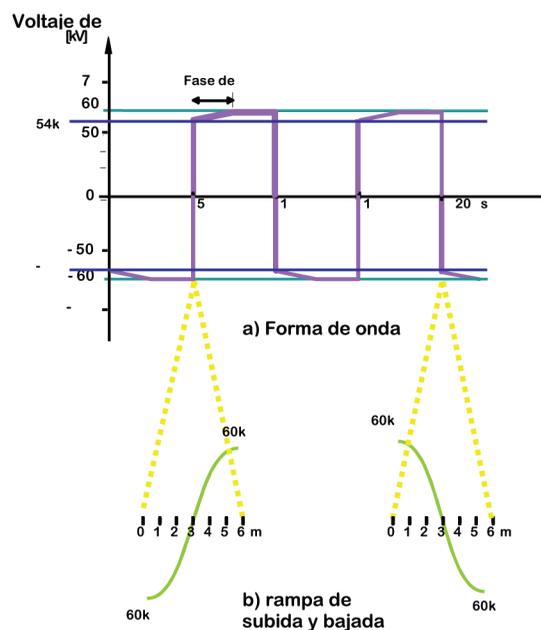


Figura 4

Los 5 segundos de cresta son a la tensión eficaz a la que deseamos llegar, la cual se mantiene por el cable y el circuito resonante del equipo. Si hubiera alguna fuga en el cable, esta sería medida y mostrada independientemente de la intensidad de carga. Cuando un cable tiene un fallo en el seno de su aislamiento, su rotura suele ser inminente, pero en sus empalmes y terminaciones no, aquí es donde entra la importancia de la corriente de fuga. Es muy usual que un empalme y terminación en mal estado aguanten la tensión de prueba, presentando una fuga de corriente. Seguidamente deberíamos realizar un diagnóstico de descargas parciales.

Si hubiera pérdidas durante los 5 segundos que dure la cresta como consecuencia de las corrientes de fuga del cable o por pérdidas eléctricas del aislamiento, durante el próximo cambio de polarización, el equipo las contrarresta, tanto en el cambio de positivo a negativo, como a la inversa. Esto hace que la onda sea simétrica perfecta.

Esta forma de onda posee la tensión pico igual a la tensión eficaz, lo cual es muy importante porque:

- » Los equipos poseen menos pérdidas reactivas y, por consiguiente, son menos pesados y consumen menos potencia.
- » Las pruebas a 50 Hz son a $2 U_o$ (eficaz), y con esta forma de onda: prueba con onda coseno rectangular $3 * U_o$ (eficaz) \approx Prueba a 50 Hz $2 * U_o$ (eficaz)

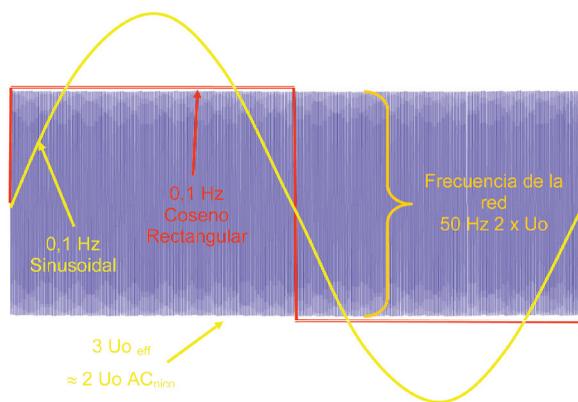


Figura 5

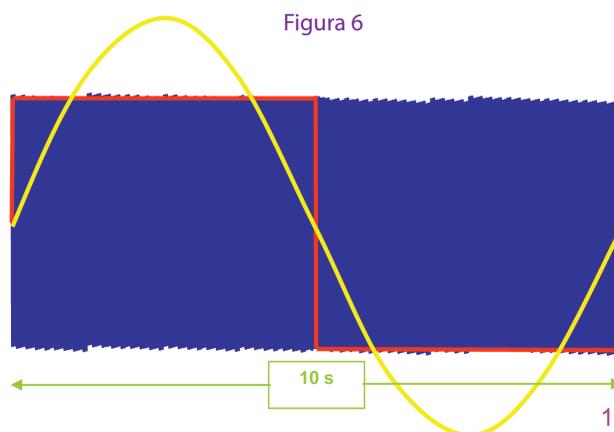


Figura 6

Como se puede ver en las figuras 5 a 14, el cambio de polarización de la onda coseno rectangular es la misma que el de la onda de 50 Hz. Afirmación que no se puede decir de la onda sinusoidal.

Finalmente observamos cómo la onda coseno rectangular es: $3 * U_o$ (eficaz) \approx la onda de 50 Hz $2 * U_o$ (eficaz).

¿Por qué la onda de coseno rectangular?

Además de la experiencia acumulada en el campo y de investigaciones y resultados científicos basados en estas aplicaciones prácticas, apostamos por la onda coseno rectangular por las siguientes razones:

- » Forma de la onda: el cambio de polaridad, que es la principal razón del ensayo con corriente alterna, es el mismo que a la frecuencia de 50 Hz de la red. Para que la onda se parezca lo máximo posible a la de la red, se utiliza una onda de subida y bajada exactamente igual a 50 Hz, pero una vez alcanzada la cresta, se alarga el tiempo en 5 segundos; de esta manera se ha conseguido un ensayo similar a los 50 Hz pero con las ventajas de 0,1 Hz.
- » Similitud con la prueba $2 U_o$ de 50 Hz: la forma de la onda es muy similar en amplitud y frecuencia a la forma de la onda de 50 Hz a $2 U_o$, pero sin los problemas de las pérdidas reactivas.
- » Fiabilidad: la rotura de zonas del cable con problemas capacitivos (empalmes y terminaciones) presenta menos resistencia ante frecuencias altas. La amplitud de la onda coseno rectangular es igual a la de 50 Hz, por lo que es 500 veces más rápida que la senoidal a 0,1 Hz.

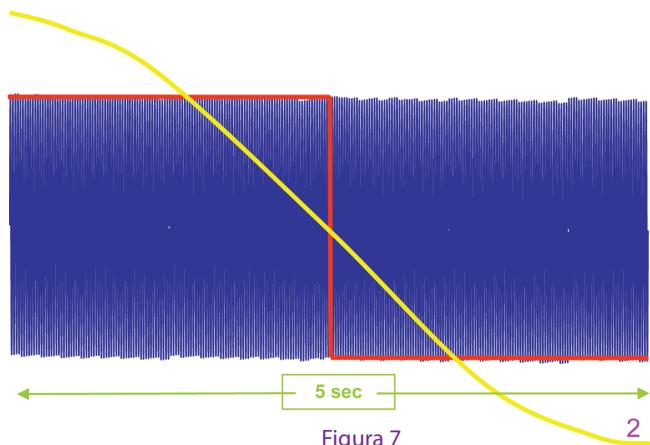


Figura 7

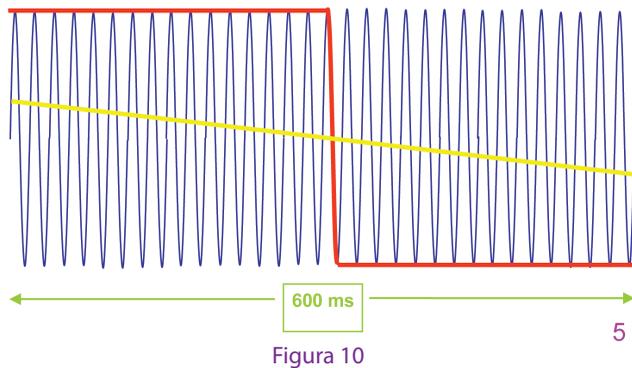


Figura 10

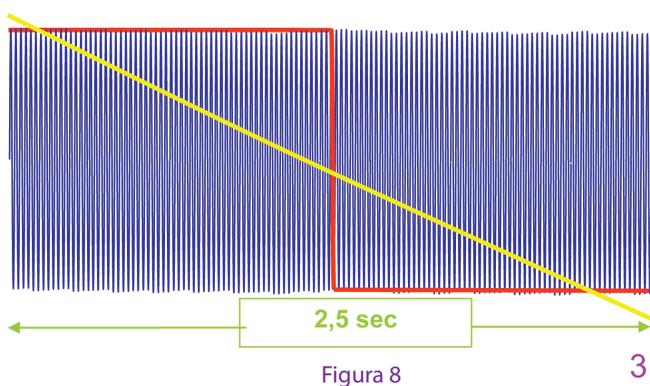


Figura 8

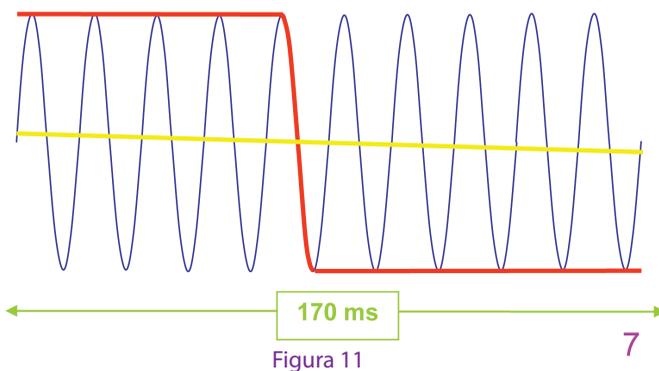


Figura 11

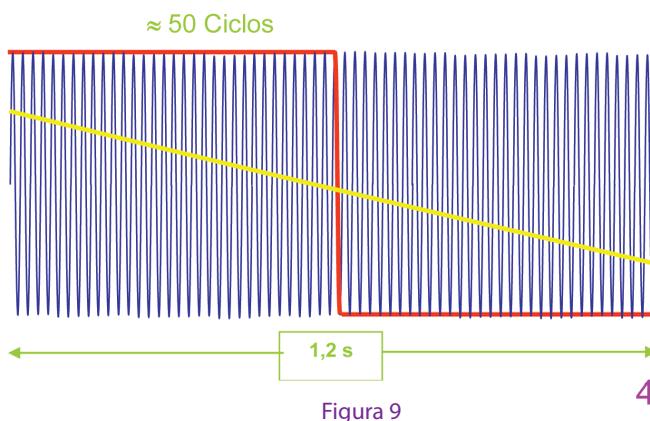


Figura 9

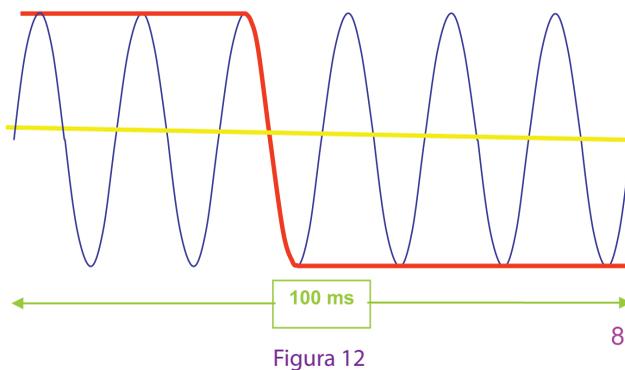


Figura 12

- » Practicidad: debido a que la energía reactiva es menor, se reduce el consumo, el peso, el tamaño y aumenta la longitud máxima de cable a ensayar. La potencia de consumo de un equipo sinusoidal es alrededor de cinco veces más y las longitudes de cable a ensayar mucho mayores.
- » Diagnóstico: la posibilidad de la medición de la corriente de fuga real independiente de la corriente de

carga del cable permite evaluar la calidad del aislamiento durante el procedimiento de ensayo.

- » Duración de la prueba: la alta capacidad de prueba, tres fases a la vez, reduce hasta un 66% la duración de la prueba.
- » Seguridad: todos los equipos portátiles o instalados en furgones llevan integrados módulos de seguridad y descargador mediante resistencia. Ninguna pértiga de

descarga u otras herramientas son necesarias. Para cables PE, XLPE y de papel-aceite, ante un defecto posible, el arco eléctrico producido se realiza de una forma controlada, para no causar daños al aislamiento sano.

- » Gestión de los datos: todos los valores que intervienen en la prueba se almacenan y pueden exportarse a una PC.

Respecto de la simetría, se puede aclarar que actualmente existen dos modelos de VLF: serie base y serie plus (la primera solo compensa las pérdidas del cable en el cambio de polarización negativa a positiva), y que el 80% de los equipos repartidos por todo el mundo son serie base y no hay ningún estudio que diga que su asimetría en el periodo negativo por posibles pérdidas del cable sean perjudiciales. Por su parte, la serie plus es completamente simétrica debido a que compensa las pérdidas del cable en todos los cambios de polarización.

Ante las limitaciones de algunos equipos para probar cables largos o de alta capacidad, tienen como única salida reducir la frecuencia del ensayo por debajo de 0,1 Hz (0,01, 0,05, 0,02, etc.). Acreditando que el efecto causado en el cable es prácticamente el mismo que con 0,1 Hz. Investigaciones recientes muestran que la tasa del crecimiento de los canales de las arborescencias eléctricas con una frecuencia de prueba de 0,01 Hz es diez veces menor que a 0,1 Hz para el mismo nivel de tensión de prueba. Una reducción de la frecuencia por debajo de 0,1 Hz para una prueba con duración de 60 minutos no es recomendable, dado que con esta frecuencia el tiempo de prueba se debe incrementar por lo menos 120 minutos.

Un ejemplo práctico fue expuesto por la distribuidora eléctrica TNB NOH de Malasia. Allí realizaron ensayos con equipos VLF de onda sinusoidal con unos buenos resultados, a continuación decidieron probar otros bajando las frecuencias 0,05 y 0,02 Hz. Los resultados fueron nefastos, ya que pasaron la prueba y una vez puestos en marcha 20,53% de los cables fallaron en servicio.

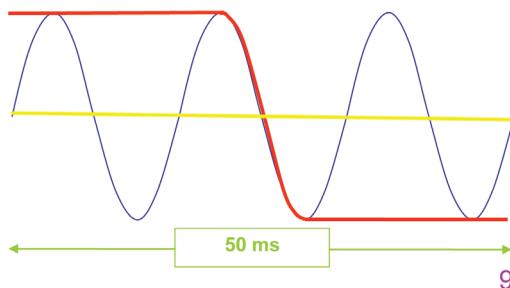


Figura 13

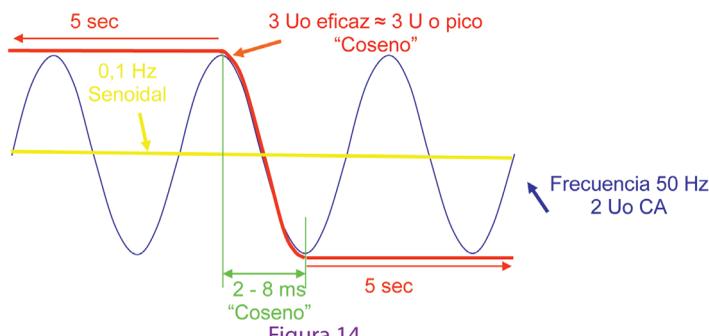


Figura 14

La tensión de onda cuadrada o trapezoidal VLF presenta un cambio muy rápido de polarización que en la práctica es solo posible sin carga. Tan pronto como se aplica una carga, la onda adquiere una forma trapezoidal, con dientes de sierra, y el cable sufre un fuerte shock ante los cambios bruscos de polarización. La onda coseno rectangular nunca produce un cambio de polarización más rápido que el producido a 50 Hz. ■

**Por Ing. Ignacio Hortal Robles
SebaKMT España**

SebaKMT es una empresa española dedicada al desarrollo y fabricación de equipos para redes eléctricas, de comunicaciones y de transmisión de fluidos. Sus productos contribuyen a la fiabilidad y a la operación rentable en cinco áreas: ensayo, diagnóstico, localización de averías de cables, localización de fugas y localización de líneas y tuberías subterráneas. En Argentina, disponibles a través de la representación de Grupo Equitécnica Hertig.

Grupo Equitécnica Hertig
www.equitecnica.com.ar
www.hertig.com.ar