

# Revisión de las investigaciones de fallos en activos de media tensión

William Higinbotham, EA Technology LLC

Kelly Higinbotham, Universidad de Connecticut

2/26/2018

## Introducción:

Los cables de media tensión son parte integrante de los sistemas eléctricos modernos y existen desde hace más de 100 años en diversas formas. En los últimos 50 años, los cables extruidos han desplazado en gran medida a los cables con aislamiento de papel. Los cables extruidos ofrecen muchas ventajas con respecto a los diseños más antiguos, pero también son propensos a fallar. Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la industria energética son los fallos de los cables. Dado que los cables suelen ser sistemas sellados, es difícil hacer una evaluación continua, y a menudo los fallos se producen sin previo aviso

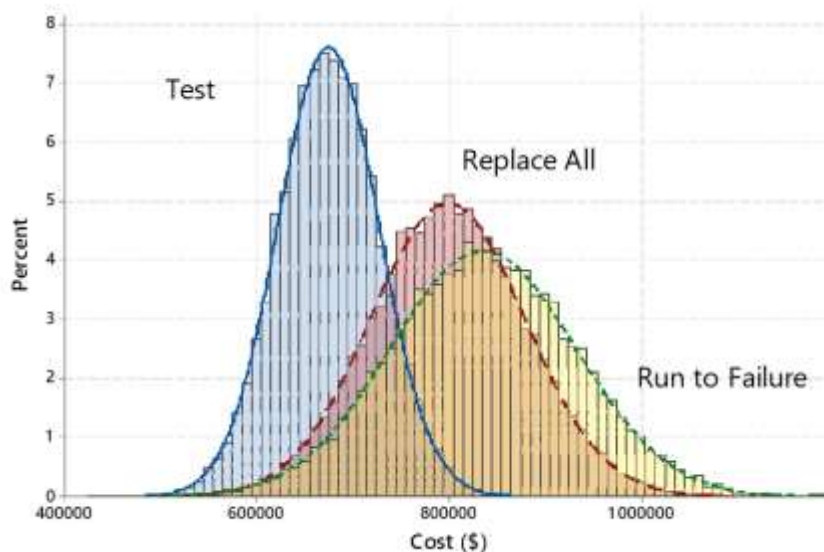


Figura 1: Comparación entre las opciones de costos

ni preparación. En la figura 1, facilitada por NEETRAC, se comparan los costos de las pruebas de los equipos, la sustitución periódica de todos los equipos y el funcionamiento de los equipos hasta el fallo. Cada costo se muestra como una distribución estándar para representar la incertidumbre asociada a los costos de los fallos. La figura muestra que los costos de las pruebas son significativamente menores y

tienen mucha menos incertidumbre que los costos asociados al funcionamiento de los equipos hasta el fallo o a la sustitución al por mayor antes del fallo.

Este documento se propone mostrar los resultados de múltiples análisis forenses, determinar las causas comunes de los fallos de los cables y identificar lo que los usuarios pueden hacer para tener información precisa sobre el estado de sus cables. Para este análisis, los fallos de los cables incluyen fallos en la terminación, los empalmes, los conectores y, simplemente, fallos en la mitad del cable. Al poder determinar con precisión los posibles problemas de los cables antes de que se produzca el fallo, podremos planificar mejor los cortes, mejorar la fiabilidad del sistema y evitar los daños colaterales causados por los fallos. Se ha demostrado que la gestión de los activos y un programa de pruebas adecuado reducen los costos asociados a las interrupciones no planificadas debidas a fallos en los cables.

## Antecedentes del estudio:

EA Technology LTD es una empresa del Reino Unido especializada en la evaluación del estado de los activos eléctricos de MT. Las capacidades de EA Technology incluyen la fabricación de instrumentos para las mediciones de campo del estado de los activos a través de metodologías para la optimización de las inversiones basadas en el estado de los activos. Para ello, EA Technology cuenta con un amplio laboratorio de investigación forense en el que ha realizado innumerables investigaciones durante los últimos 50 años. Este documento analiza un subconjunto de las investigaciones forenses que EA Technology ha realizado en cables y componentes fallidos para determinar los mecanismos de fallo y establecer recomendaciones para componentes de sistemas similares. Este análisis puede proporcionar información sobre el mecanismo de fallo, destacar otros activos en riesgo y recomendar estrategias de gestión de activos para reducir el riesgo de fallo en el futuro. Además, estos informes proporcionan

información sobre la calidad del fabricante y la mano de obra del carpintero. A partir de estos informes, intentamos determinar dos cosas principales: la causa próxima y la causa final. En primer lugar está la causa próxima, que es la causa directa obvia del fallo. Ejemplos de ello son la entrada de humedad y los daños mecánicos. El siguiente elemento es la causa última del fallo del sistema. La causa última es la razón más profunda y sistemática por la que se ha producido el fallo. A menudo se trata de errores de mano de obra, de formación o de aplicación. Para pasar de la causa próxima a la causa final, los autores utilizaron una práctica de gestión comúnmente utilizada llamada "los 5 porqués". Al formular la pregunta "¿Por qué?" y luego cuestionar la respuesta con "¿Por qué?" de forma consecutiva, a menudo se puede encontrar la causa última de un suceso. La causa próxima del hundimiento del Titanic es que chocó con un iceberg. Al abordar eso, se pasaría por alto la causa última de que las líneas de la estrella blanca tenían problemas sistemáticos que devaluaban la seguridad de los pasajeros. La esperanza es que si se abordan las causas últimas de un fracaso, se puede evitar que se desarrolle una gama más amplia de causas próximas. A lo largo de este documento, se han desarrollado tendencias importantes tanto en las causas próximas como en las últimas, así como en las acciones recomendadas para resolverlas.

Debe entenderse que esta prueba incluyó un pequeño número de muestras durante un corto período de tiempo. Aunque los autores creen que los resultados son representativos de las condiciones reales del campo, esto no se puede garantizar. El tamaño de la muestra, el periodo de tiempo, las motivaciones de las investigaciones, etc., podrían contribuir a las variaciones respecto a un estudio más detallado. El lector debe tener en cuenta esta posibilidad al considerar los resultados presentados.

## Proceso de investigación forense de fallos;

Las investigaciones de EA Technology comienzan con una investigación visual de las muestras y un análisis de la línea de tiempo del fallo, si se proporciona. A continuación, se revisan los parámetros y las instrucciones de la aplicación y se realiza un desmontaje mecánico. Una vez desmontado, se realiza una investigación analítica y pruebas mecánicas especializadas según sea necesario. Por último, se entrega un informe al cliente en el que se detallan las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

En primer lugar, una investigación visual puede proporcionar detalles vitales sobre errores de mano de obra y fabricación, descargas parciales y entrada de humedad en los cables. Este paso también suele incluir la documentación del lugar y de las condiciones del fallo. Si es posible, un representante de EA Technology estará presente en la retirada del componente que ha fallado para garantizar que no se pierda ninguna información durante el proceso de retirada. Estar presente también permite a EA Technology tener una mejor comprensión de los factores que condujeron a la falla. A continuación, el equipo revisará los parámetros de aplicación y las instrucciones proporcionadas por el fabricante en el momento de la instalación. Éstas se utilizarán como referencia para la inspección visual y se verificará que sean precisas y claras. La inspección visual concluye con el desmontaje mecánico del elemento defectuoso. El cable se desmonta capa por capa y se documenta exhaustivamente con fotografías y mediciones. Esto suele decir mucho sobre la mano de obra y la edad y el estado del cable.

El siguiente paso es la investigación analítica. Los detalles varían en función del tipo de aislamiento, pero en general la investigación analítica profundiza en los problemas sospechosos y determina la gravedad de los problemas subyacentes. En el caso del XLPE, la muestra se hierva en aceite de clavo para hacerla transparente. Esto permite a los investigadores examinar microscópicamente secciones finas del

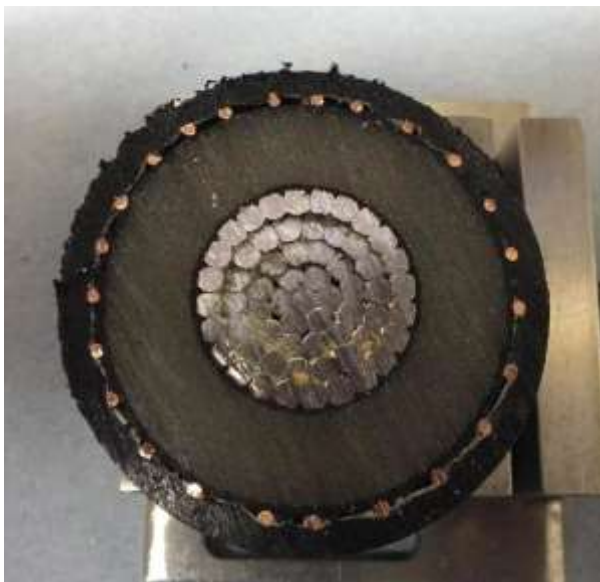


Figura 2: Aislamiento XLPE

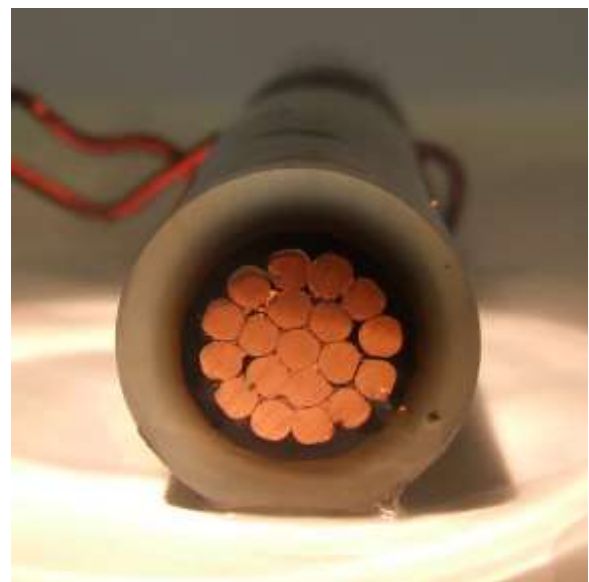


Figura 3: Aislamiento XLPE transparente

aislamiento para visualizar cualquier inclusión y ámbar del proceso de fabricación. Las inclusiones proceden de materias extrañas que se atascan en el aislamiento durante el proceso de extrusión. Los ámbar son trozos de aislamiento que no se han convertido completamente en el material final. Ambos pueden afectar a la constante dieléctrica del aislamiento, pero los materiales extraños tienen un efecto más negativo en la calidad del aislamiento. El hecho de que el aislamiento sea transparente también permite ver los árboles de agua que se desarrollan en el aislamiento. Éstos podrían haber contribuido a la avería, o podrían indicar problemas subyacentes en función del tamaño y la ubicación. En el caso de los cables aislados con aceite de papel, la investigación analítica examina los numerosos factores mecánicos que pueden provocar el fallo del cable. Para ello, se desenreda el papel y se buscan dos aspectos principales.

En primer lugar, se comprueba que el solapamiento de los hilos sea uniforme, ya que un solapamiento desigual puede provocar la concentración de los campos eléctricos y, a su vez, puede provocar una descarga parcial. En segundo lugar, se comprueba que los hilos no tengan residuos cerosos en los intersticios de los papeles. Estos residuos cerosos pueden indicar que se está produciendo una descarga parcial en el cable y es un claro indicio de que hay huecos o humedad que afectan a la fiabilidad del cable.

Cuando es necesario, se realizan pruebas de material especializadas para obtener más información sobre las muestras. Las tres pruebas principales que se realizan son la microscopía electrónica de barrido, la



Figura 4: Espectroscopia elemental basada en el microscopio electrónico de barrido

calorimetría diferencial de barrido y las pruebas mecánicas. La microscopía electrónica de barrido, como se ve en la figura 4, puede utilizarse para realizar análisis elementales en la inclusión para identificar compuestos extraños. Esto se puede utilizar para comparar los materiales de la inclusión con el aislamiento a granel y posiblemente determinar los impactos que la inclusión tendría en las constantes dieléctricas. La Calorimetría Diferencial de Barrido puede utilizarse para determinar la temperatura máxima alcanzada por el componente antes del fallo. Esta es una información importante para determinar

si el componente se utilizó en una aplicación incorrecta y si el sobrecalentamiento contribuyó al fallo. Por último, se pueden realizar pruebas mecánicas en los componentes de los cables para determinar las características del material que indican si un componente era apropiado para la aplicación en la que se utilizó. Esto se suele hacer para los componentes que se espera que realicen tareas mecánicas.

Los resultados de todas las pruebas se recopilan en un informe y se redactan recomendaciones basadas en los resultados. Los informes de los clientes incluyen una documentación detallada del proceso de investigación, las conclusiones y las recomendaciones. Las conclusiones se estructuran para resaltar las causas próximas y últimas de los fallos a partir de los datos recogidos en el informe. Por último, se ofrecen recomendaciones para abordar las causas próximas y últimas del fallo. El informe suele incluir varios tipos de recomendaciones. En primer lugar, hay sugerencias destinadas a abordar los activos de riesgo actuales reduciendo el riesgo de fallo. A menudo, las actualizaciones de los cables forman parte de una gran actualización del programa, por lo que un cable defectuoso podría indicar problemas más importantes en el sistema. En segundo lugar, hay sugerencias dirigidas a las modificaciones internas que pueden prevenir estos problemas en el futuro. Puede tratarse de un nuevo programa de formación para los ensambladores o de un programa de gestión de activos destinado a prevenir los fallos al final de la vida útil. Por último, en ocasiones hay recomendaciones dirigidas a los factores externos que han contribuido al fallo. Ejemplos de ello son informar a un fabricante de un defecto o de un mal diseño, o simplemente cambiar de proveedor para utilizar materiales de mayor calidad. Todas las recomendaciones sientan las bases de un sistema más fiable con el objetivo de reducir los fallos.



Nuestro estudio recopila los datos extraídos de un conjunto de informes para analizar las mayores tendencias que indican sus resultados y recomendaciones. Extrajimos 100 informes generados en 2011-2015 de la base de datos de informes de análisis forense de EA Technology. Tras la revisión inicial, 27 de los informes se consideraron irrelevantes y se descartaron del estudio. A menudo se trataba de clases de tensión más bajas o de fallos mecánicos, o bien se trataba de un informe de evaluación del estado, no de un informe de análisis de fallos. Los 73 informes restantes se clasificaron y analizaron en función de las siguientes características: edad del cable, tipo de aislamiento, clase de tensión, condiciones de instalación, localización del fallo, causas del fallo y recomendaciones. Estas características se representaron gráficamente y se analizaron en busca de tendencias evidentes.

## Resultados:

La primera métrica que se analizó fue la edad del cable cuando se produjo el fallo. Se comprobó que la

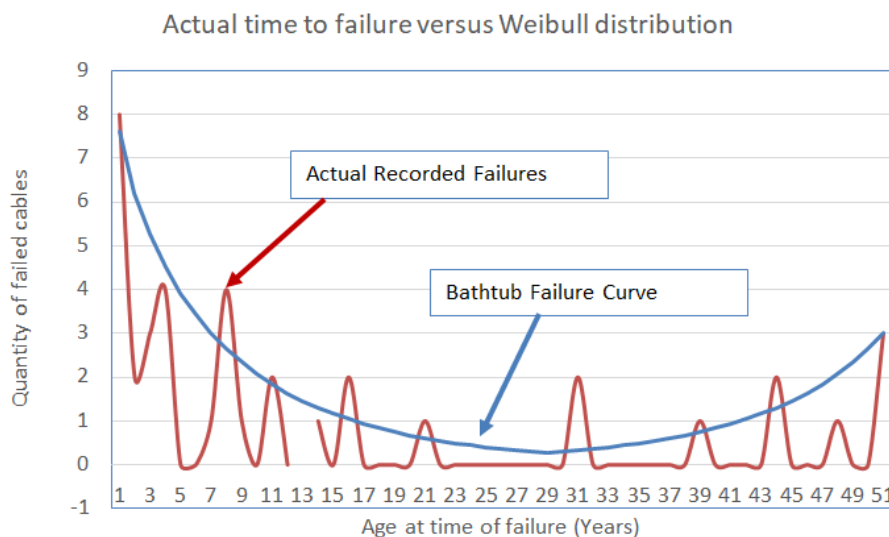


Figura 5: Gráfico de tiempo hasta el fallo

ocurrencia de fallos se ajustaba a la distribución de Weibull, el patrón de la curva de bañera que se muestra en la figura 5. Los fallos pueden clasificarse en tres categorías principales: mortalidad infantil, fallos aleatorios y fallos al final de la vida útil. Los fallos por mortalidad infantil constituyen el mayor segmento del gráfico y duran aproximadamente 10 años después de la instalación. Tras la sección de mortalidad infantil, se producen fallos aleatorios durante los siguientes 30 años aproximadamente. Son intermitentes y, en general, no están correlacionados. Alrededor de 40 años después de la instalación, comienzan a producirse fallos de fin de vida y todos los fallos posteriores a este punto se clasifican como tales. Los fallos del final de la vida útil generalmente sólo se evitan con la sustitución, pero la mortalidad infantil y los fallos aleatorios pueden evitarse estudiando a fondo las causas y actuando en consecuencia.

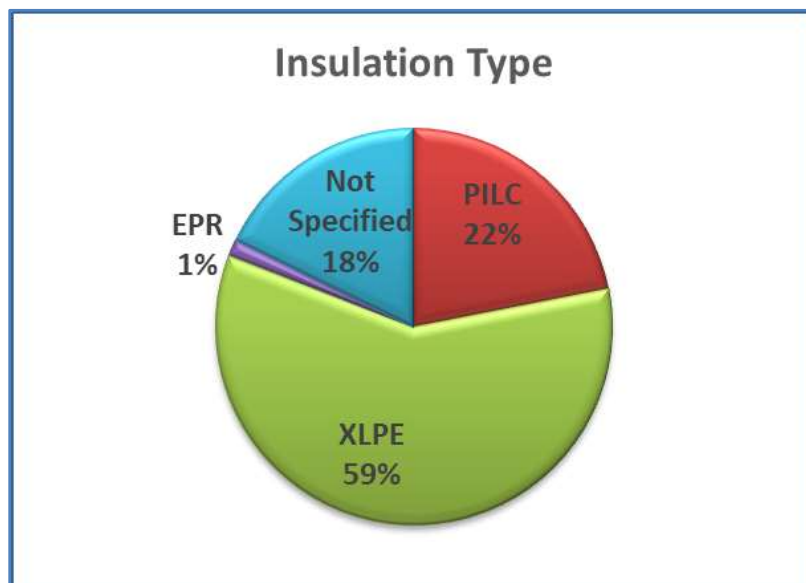


Figura 6: Tipo de aislamiento

A continuación, se analizaron los muestreos del informe según el tipo de aislamiento y el tipo de fallo. Basándonos en el "Historical Overview of Medium and High Voltage Cables" escrito por el grupo NEETRAC de Georgia Tech, los cables XLPE y PILC muestran una proporción similar de fallos por

milla de cable instalado. El EPR muestra desproporcionadamente menos fallos por milla. Esto puede verse en la figura 6, que muestra sólo un 1% asociado al cable EPR.

A continuación, analizamos dónde se producían los fallos. Según las localizaciones de los fallos observadas en el muestreo del informe, el 68% de las averías se producen en lugares donde los técnicos están trabajando en los cables sobre el terreno. El 25% de las averías se producen en la mitad del cable, donde los técnicos probablemente no han manipulado mucho el cable. Está claro que el hecho de trabajar en el cable sobre el terreno puede provocar fallos. Algunas explicaciones para los fallos en mitad del cable serían daños mecánicos, aplicación incorrecta, defectos de fabricación o simplemente son fallos aleatorios sin una razón clara.

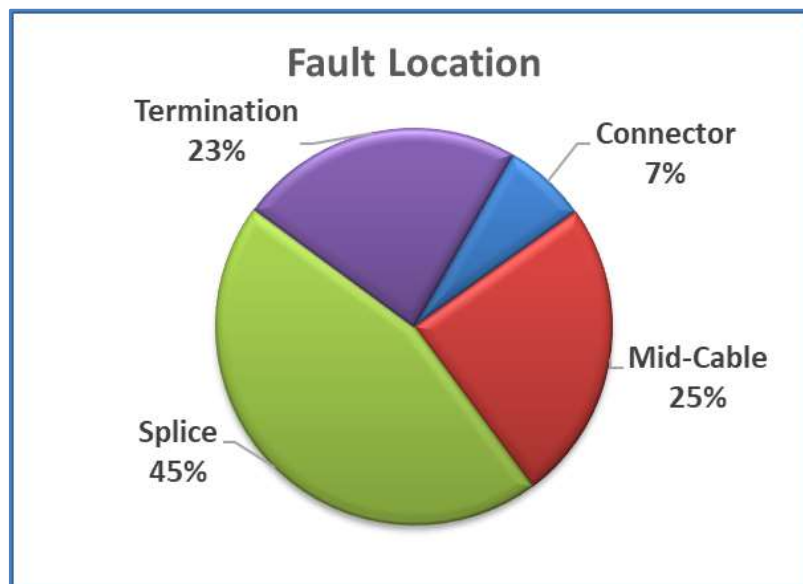


Figura 7: Localización de la avería

A continuación, caracterizamos y representamos las causas próximas de los fallos en la figura 8. Al revisar las causas próximas de los fallos, aparecen varias tendencias interesantes. Los errores de montaje son la causa del 33% de los fallos encontrados habitualmente. Esto indica una falta de comunicación efectiva entre fabricantes e instaladores o en la formación de los ensambladores. Además, otro 40% se

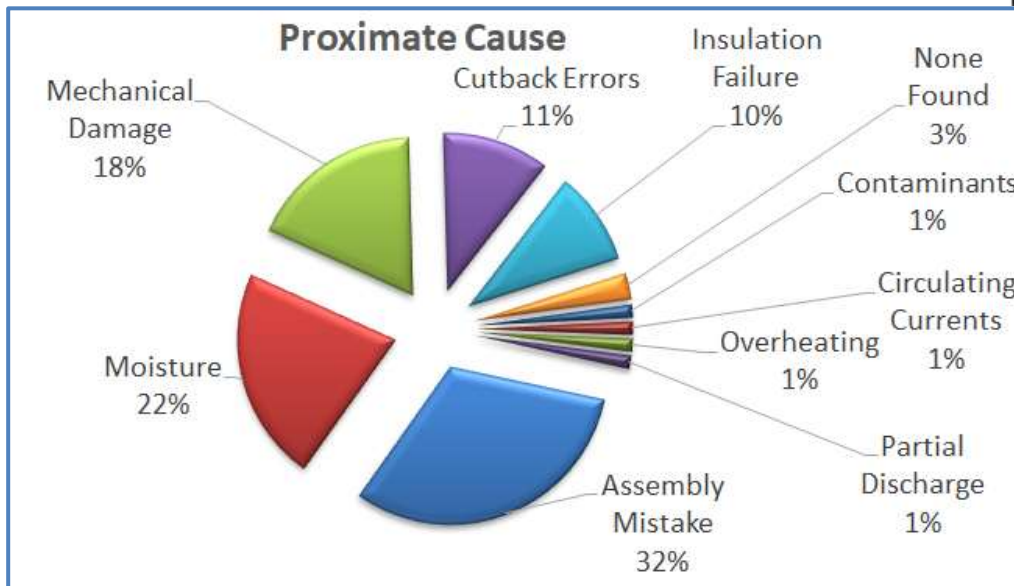


Figura 8: Causas próximas de fallo

debe a daños evitables en el cable, ya sea por humedad o por daños mecánicos. Pequeños porcentajes pueden atribuirse a contaminantes, corrientes circulantes y sobrecalentamiento.

Lo que falta en esta imagen es el detalle de lo que causa estos fallos. La causa próxima proporciona una visión de lo que ha ocurrido, pero a menudo carece de la complejidad del razonamiento completo que hay detrás de un fallo. Al examinar las causas últimas del muestreo, vemos que la gran mayoría de los fallos pueden atribuirse a errores de mano de obra. Esto incluiría cualquier error de unión debido a la negligencia o la inexperiencia, así como cualquier trabajo descuidado y la falta de cuidado. El 6% de los fallos se debieron a la edad, lo que es inferior a lo esperado según la correlación con la distribución de Weibull comentada anteriormente. Los defectos de fabricación representaron alrededor del 11% de todas las causas últimas, lo que es más alto de lo esperado. Éstas van desde los contaminantes en el aislamiento hasta el incumplimiento de los requisitos de separación de conductores en los cables nuevos. Sólo en el 4% de los casos no se encontró ninguna causa última, lo que sugiere que se pueden tomar medidas para solucionar la gran mayoría de los fallos de los cables.

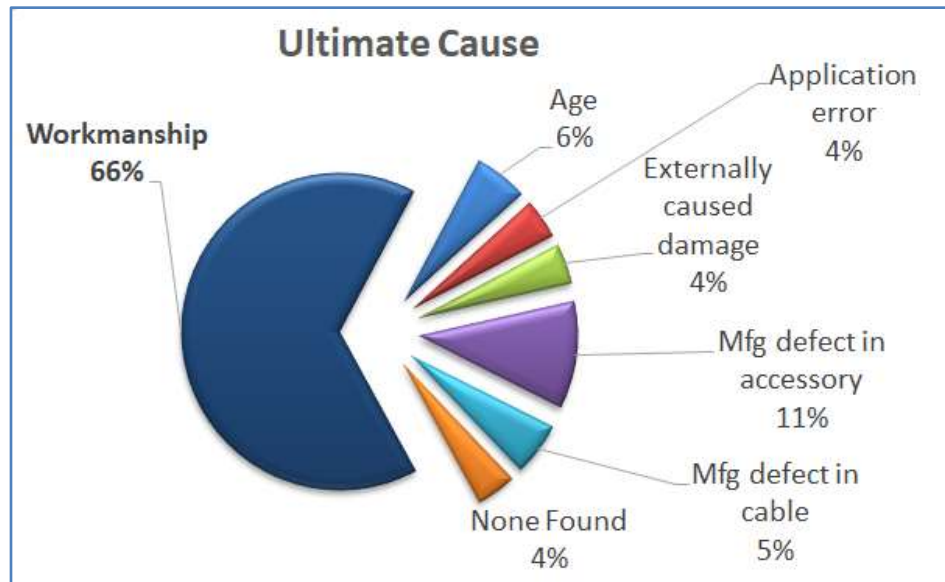


Figura 9: Causas últimas de fallo

Basándose en las causas últimas y próximas de los fallos, hay varias recomendaciones estándar que ayudarían a prevenir futuros fallos. La acción más comúnmente recomendada fue la de realizar regularmente un mapeo de descargas parciales. La descarga parcial es una descarga de una parte del sistema de aislamiento debido a un campo eléctrico localizado mayor que la capacidad de resistencia dieléctrica de esa parte, mientras que el sistema de aislamiento general sigue siendo capaz de soportar los campos eléctricos aplicados. La descarga parcial se encuentra comúnmente alrededor de los huecos en el aislamiento y produce una variedad de subproductos detectables como calor, luz, sonido, olor, ondas electromagnéticas y una corriente eléctrica de alta frecuencia. Dado que la prevalencia de las descargas parciales puede indicar problemas con la calidad del aislamiento, una rutina de mapeo de descargas parciales puede ayudar a los clientes a planificar las interrupciones para abordar los problemas antes de que se agraven. Las pruebas de descargas parciales en los cables pueden proporcionar datos sobre cómo el envejecimiento y las condiciones han afectado a los cables instalados, y ayudar a priorizar la sustitución y la reparación.

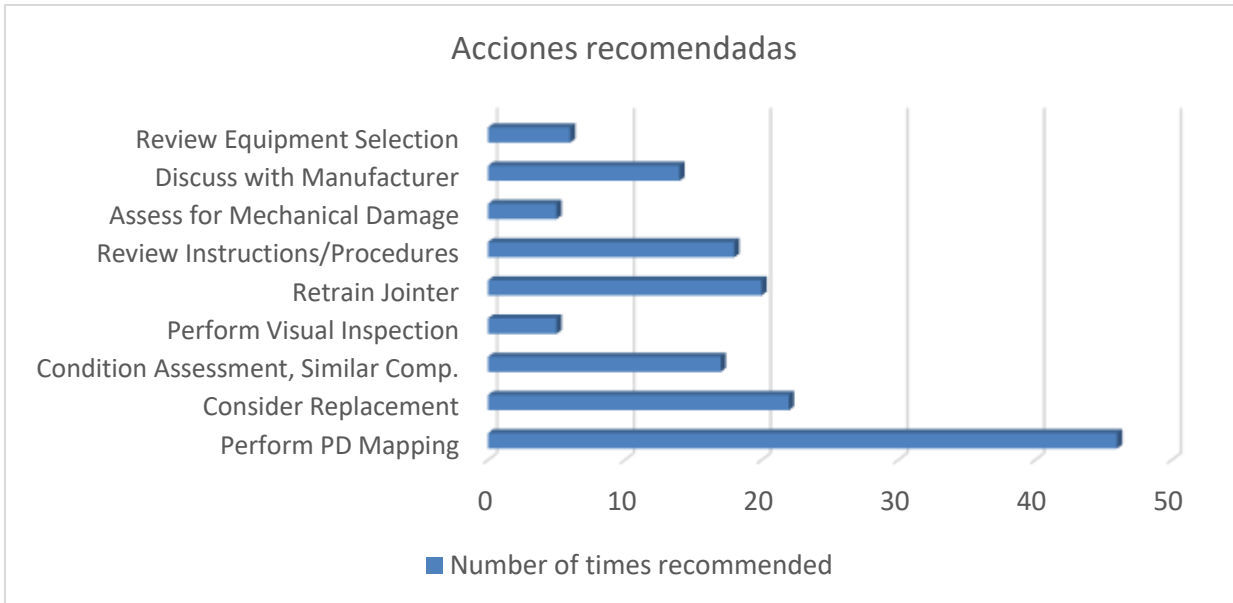


Figura 10: Acciones de recomendación para los equipos existentes

La sustitución es una acción comúnmente recomendada, pero en general se considera sólo una de las muchas opciones. La prevalencia de las recomendaciones de mapeo de DP y de evaluación del estado sugiere que unas técnicas adecuadas de gestión de activos pueden ayudar a evitar la sustitución inoportuna de los equipos en funcionamiento al proporcionar información adicional sobre su estado de

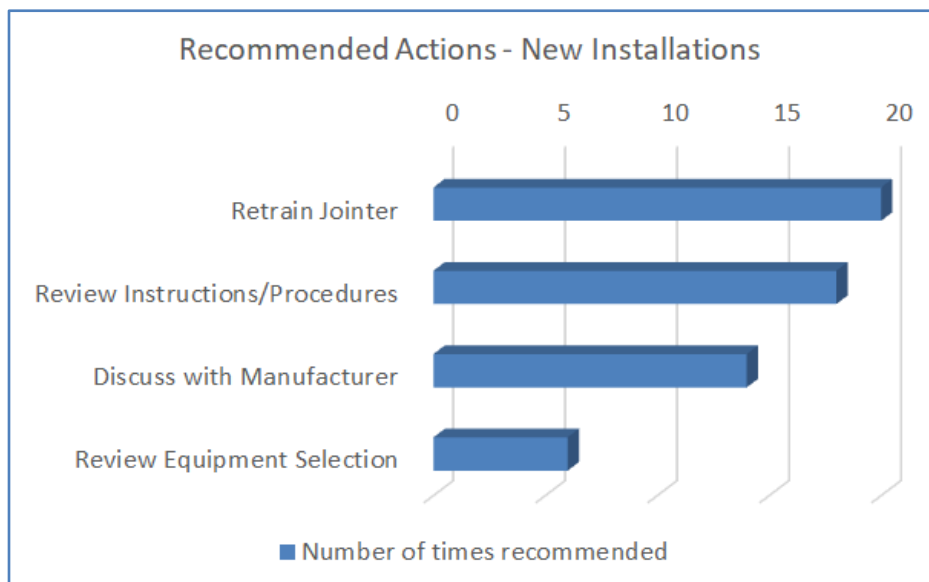


Figura 11: Acciones recomendadas para las nuevas instalaciones

funcionamiento. También se recomienda a menudo hablar de la avería con el fabricante. Al tener una comunicación clara y abierta con el fabricante, es menos probable que haya errores de instalación o de aplicación. Asimismo, dado que el 11% de las averías se producen por defectos de fabricación, es importante tener claras las expectativas de calidad del fabricante. Proporcionarles información sobre los componentes defectuosos puede evitar que los futuros problemas de calidad le cuesten tanto a largo plazo. La inspección visual es relevante para algunos fallos, pero la mayoría de las veces se considera que tiene un valor limitado, ya que la mayoría de los problemas están ocultos. Esto refuerza el valor del mapeo de descargas parciales, ya que proporciona datos que no pueden obtenerse sólo con la inspección visual sobre el estado y la longevidad de los cables.

Las recomendaciones para evitar fallos en futuras instalaciones se centran en garantizar que la formación de los ensambladores sea de alta calidad. Contar con carpinteros bien formados es fundamental para tener un sistema fiable, ya que un alto porcentaje de los fallos puede deberse a problemas de unión. Para ello, hay que formar bien a los ensambladores y asegurarse de que las instrucciones y los procedimientos son claros y preparan a los ensambladores para el éxito. Hablar con los fabricantes a lo largo del proceso de actualización de un programa puede garantizar que las instrucciones se siguen con precisión. Por último, se recomienda con frecuencia elegir el equipo correcto para la aplicación, ya que los errores de aplicación causan alrededor del 4% de los fallos de este muestreo.

## Ejemplos

El primer ejemplo estudiado es un adaptador de PICAS a XLPE de 11 KV que falló una hora después de su instalación. Después de la investigación, se determinó que la causa próxima era un posicionamiento incorrecto de los tubos del adaptador. Por otra parte, se determinó que los errores de mano de obra fueron

la causa última del fallo. A lo largo de la investigación, se encontraron muchos problemas de calidad. Los pernos de cizalla estaban mal alineados, no había masilla en los pernos de cizalla, los tubos estaban mal cortados y había huecos en el aislamiento en toda la muestra. Las recomendaciones comunes a estas conclusiones incluyen el reciclaje de los ensambladores y la evaluación de los componentes realizados en



Figura 12: Junta XLPE/PICAS

el marco de este proyecto. Este ejemplo pone de manifiesto que no basta con encontrar y solucionar la única causa próxima del fallo. Hubo varios errores que habrían conducido al fallo si no hubiera existido la primera causa. Si se abordara la causa última de la formación de la ensambladora, se solucionarían todos los problemas de mano de obra y los posibles puntos de fallo.



El siguiente ejemplo estudiado fue un empalme XLPE de 33KV que falló tras 18 meses de servicio. El orificio de la avería es visible a través del aislamiento en la figura siguiente. El fallo se produjo porque el



Figura 13: Localización del fallo en la junta XLPE de 33KV

conector no fue desbarbado correctamente por el ensamblador. El borde afilado causó daños mecánicos y creó una concentración de campos eléctricos en el aislamiento dañado. El resultado de este fallo fue que la mala comprensión de las instrucciones, la falta de atención a los detalles y la falta de formación contribuyeron al fallo de esta unión.

El último ejemplo estudiado es un cable PILC que falló tras 47 años de servicio. El cable de 11KV experimentó un fallo en la mitad del cable como se ve en la figura 14. Este fallo es el resultado de una descarga parcial relacionada con la edad. Aunque este cable estuvo en servicio durante una vida útil adecuada, es un ejemplo de cómo la cartografía de las descargas parciales podría haber evitado un fallo imprevisto. Si se hubiera detectado la descarga parcial antes, el cliente habría podido planificar una interrupción para solucionar los problemas.



Figura 14: Cable PILC averiado

## Conclusiones:

Dado que las averías de los cables suponen un costo importante para los clientes cada año, la identificación de las tendencias de los sucesos puede ayudar a reducir los costos futuros relacionados con las averías. El análisis forense permite a la comunidad aprender de los fallos pasados para promover un sistema más fiable y robusto. De la investigación de 73 informes de análisis forense se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Las averías de los cables siguen una curva de fiabilidad predecible y, por lo general, cabe esperar que fallen en los primeros diez años o después de 40 años de servicio. Dado que alrededor

del 35% de los fallos se producen en los primeros diez años, es vital que se instalen con cuidado para evitar la mayoría de los fallos relacionados con la mortalidad infantil.

- Si se garantiza que las instalaciones se realizan siguiendo unas instrucciones claras y precisas del fabricante, se podrían evitar 2/3 de las averías.
- Dado que el error humano es inevitable en todos los campos, un programa adecuado de gestión de activos basado en pruebas de descarga parcial puede ayudar a identificar y priorizar los problemas a medida que se desarrollan.

Además, dado que los fallos son inevitables, la realización de un análisis forense post-mortem puede ayudar a diagnosticar las causas de los fallos y a identificar tendencias en los fallos asociados a su empresa y a sus proveedores. Aunque se han mostrado tendencias universales a través de estos informes, éstas no indican necesariamente que todas las empresas deban priorizar la recomendación de la misma manera. La empresa A puede tener excelentes empalmes con cables de baja calidad, mientras que la empresa B tiene componentes de la más alta calidad y algunas prácticas deficientes que están afectando a sus instalaciones. Al recibir una evaluación y unas recomendaciones personalizadas, puede sacar a la luz problemas específicos de su empresa o de sus instalaciones. El análisis forense proporciona un análisis mucho más detallado que el que puede realizar una revisión de campo, e incluso puede ayudar a prevenir futuros fallos al buscar más allá de las causas próximas. Incluso en los casos en los que no hay una causa raíz evidente, cada investigación se suma a nuestra base de conocimientos y puede ayudarnos a crear sistemas más fiables en el futuro.