



## **DETECCIÓN DE SULFURO CUPROSO EN PAPELES DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA FALLADO**

**L. J. Catalano\***

**R. E. Álvarez\***

**M. D. del Pozo\***

**\* Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos –  
Laboratorio de Alta Tensión – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La  
Plata**

### **RESUMEN**

La identificación de las causas de las fallas de los equipos es una tarea importante para el mejoramiento de la confiabilidad de los sistemas eléctricos. Cuando se presume que la falla de un transformador se debe a la corrosión de cobre por compuestos de azufre provenientes del aceite, resulta de suma importancia inspeccionar el aspecto físico de los papeles aislantes. Si se detecta coloración de los papeles se debe verificar la presencia de la corrosión de cobre mediante técnicas especiales como la microscopía electrónica de barrido.

En este trabajo se presenta un caso donde se investigó la presencia de compuestos de la corrosión del cobre en los papeles aislantes extraídos del bobinado dañado, mostrando las fotografías y espectros de energía obtenidos con un microscopio electrónico para distintos grados de contaminación del papel.

### **PALABRAS CLAVE**

Transformador, sulfuro corrosivo, sulfuro cuproso, aislamiento, aceite dieléctrico, microscopía electrónica, SEM, EDX, investigación forense.

### **1. INTRODUCCIÓN**

En los últimos diez años se reportaron numerosas fallas en transformadores y reactores de potencia debido al fenómeno conocido como sulfuro corrosivo. Una vez que se reporta una falla, el proceso forense de identificar su causa resulta muy importante. Esto último resulta imprescindible para evitar fallas similares, identificar defectos de fabricación, operación y/o mantenimiento, determinar responsabilidades y las consecuencias asociadas (garantía, seguros).

Cuando la falla es causada por el fenómeno de sulfuro corrosivo es posible identificar la formación de sulfuro cuproso, cuya fórmula química es  $\text{Cu}_2\text{S}$ , mediante inspección del papel aislante en contacto con los conductores de cobre. El sulfuro de cobre se deposita en la superficie del papel tiñéndolo y penetrando en el aislante. Según la severidad de la contaminación se obtienen distintas tonalidades. En a Fig. 1 se presenta una clasificación visual de referencia [1].

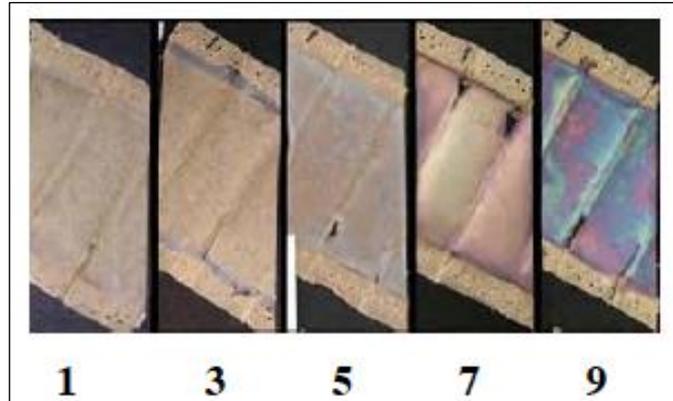


Fig. 1- Clasificación de los depósitos según la tonalidad del papel

Además de la inspección visual, la presencia de sulfuro cuproso debería ser confirmada por otros métodos, uno de los propuestos por la bibliografía es analizar los compuestos por una sonda de electrones (EDX) [2].

## 2 TRANSFORMADOR FALLADO

Al cabo de unos diez años de servicio, el transformador objeto del estudio (132/13,2 kV de tensión y 300 MVA) sale de servicio por actuación de protecciones de sobrecorriente. Confirmado el daño en el sistema aislante por medio de ensayos, se procede al descubado, comprobándose el daño severo en el arrollamiento de alta tensión de una de las fases.

Con el fin de encontrar las razones de la falla, se procedió al desarme forense del arrollamiento de alta tensión. Entre las tareas forenses, se tomaron muestras de papel de diferentes sectores del arrollamiento con el fin del posterior análisis de microscopía electrónica.

## 3 CARACTERÍSTICAS DEL SULFURO CUPROSO

### 3.1 Mecanismo de formación

Los aceites dieléctricos de origen mineral tienen un cierto grado de contenido de azufre proveniente del petróleo crudo. El petróleo crudo puede contener hasta un 20% de azufre o compuestos de azufre. Sin embargo no todos esos compuestos resultan corrosivos.

En la etapa de refinación del petróleo pueden eliminarse la mayoría de los compuestos de azufre. Existen compuestos sulfurosos que tienen un comportamiento beneficioso para el aceite. Estos compuestos son inhibidores naturales de la oxidación del aceite, lo que prolonga la vida del mismo. Existe por lo tanto un punto óptimo en el proceso de eliminación de compuestos de azufre el cual debe extraer los compuestos corrosivos pero por otro lado mantener una cantidad que haga estable el aceite ante la oxidación. Cada fabricante de aceite tiene sus propios procesos de producción, debiendo en cada caso cumplir los requerimientos de los estándares internacionales.

Ciertos compuestos de azufre en el aceite producen la corrosión del cobre; formándose entonces sulfuro cuproso ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). A medida que avanza el proceso de corrosión, el compuesto  $\text{Cu}_2\text{S}$  se incorpora en las capas de papel del sistema aislante, modificando las propiedades dieléctricas.

El proceso de corrosión del cobre, es tanto mayor cuanto mayor sea la temperatura como sucede con casi todas las reacciones químicas. Es por esta característica que las máquinas más susceptibles son las que trabajan con altos niveles de temperatura como reactores en derivación, transformadores de estaciones conversoras alterna/continua o máquinas de salida de centrales generadoras.

A partir de la disminución de las propiedades dieléctrica pueden originarse descargas parciales, las que a su vez, pueden desencadenar, bajo condiciones de sollicitación (energización u otro tipo de transitorios, etc.) una falla total en el sistema aislante.

En la Fig. 2 se muestra un esquema del proceso de deterioro que produce la contaminación del aislamiento sólido con el sulfuro cuproso.

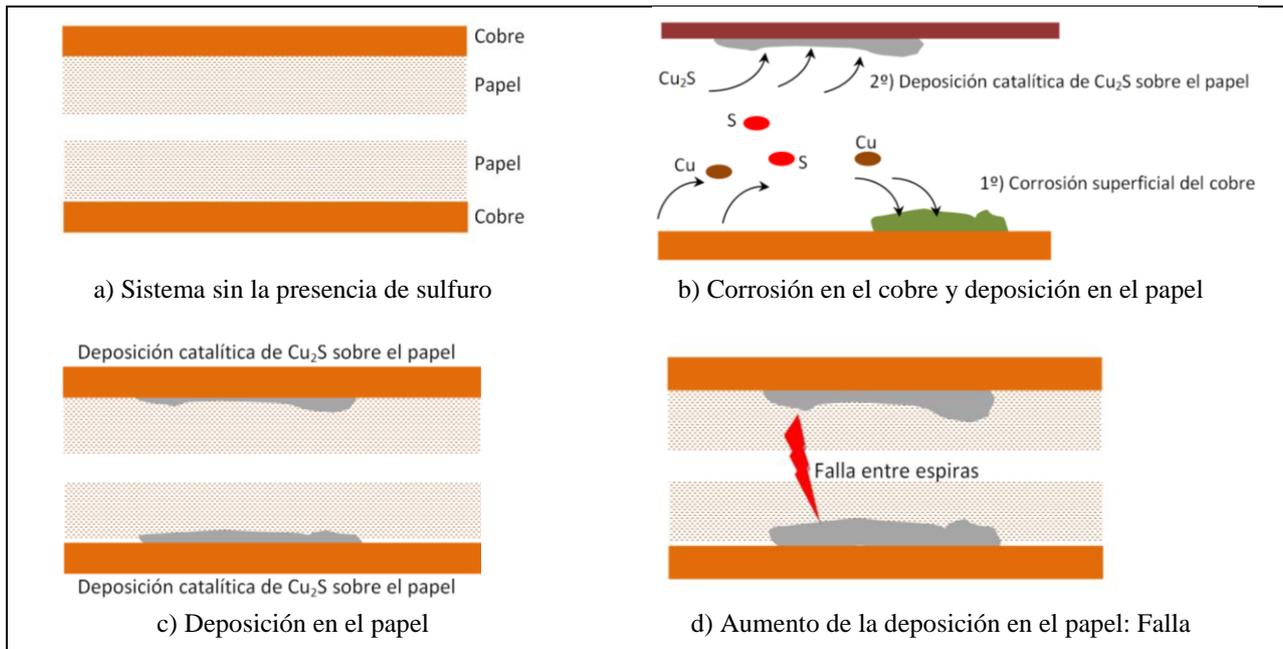


Fig. 2 - Formación del sulfuro y deterioro del papel aislante

### 3.2 Aspecto

El  $Cu_2S$  depositado sobre el cobre, presenta un aspecto de color de diversos tonos que van desde el rojo-azul-violeta al verde y negro grafito.

De igual modo, la tonalidad de los depósitos sobre la celulosa próxima al conductor varía en color y en aspecto general, con frecuencia tiene un brillo metálico junto con matices violetas, azules y verdes, como se observa en la Fig. 1.

## 4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA Y ESPECTRO DE ENERGÍA

### 4.1 Metodología y procedimiento

Un microscopio electrónico es aquél que utiliza electrones en lugar de fotones o luz visible para formar imágenes de objetos diminutos. Los microscopios electrónicos permiten alcanzar ampliaciones hasta 5000 veces más potentes que los mejores microscopios ópticos, debido a que la longitud de onda de los electrones es mucho menor que la de los fotones "visibles".

En nuestro caso, con un microscopio electrónico de barrido SEM (scanning electron microscope) se fotografió con magnificación X200, X1000 y X3000, la superficie de muestras de papel extraídas de un transformador fallado. Los compuestos fueron analizados por el espectro de energía obtenido por una sonda de electrones EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy).

Cuando se requiere visualizar una muestra en un microscopio electrónico de barrido ésta debe ser conductora ya que, de no ser así, se carga durante la irradiación por una acumulación de carga que

desvía el haz electrónico y, como consecuencia de ello, aparecen distorsiones en la imagen. Una solución a este problema es recubrir la muestra con una película conductora, de espesor comprendido entre 10 y 25 nm. En esta oportunidad se utilizó un depósito superficial de oro (Au).

Previamente a las exploraciones fue necesaria la limpieza de las muestras extrayéndole todo rastro de aceite. Para ello las muestras fueron colocadas en un baño de solvente durante 12 h y luego secadas. Terminado este proceso los papeles quedaron libres de aceite y de solvente.

#### 4.2 Equipos utilizados

El equipamiento empleado fue el siguiente:

- Microscopio electrónico de barrido Philips SEM 505
- Analizador de espectro de energía por sonda de electrones EDAX DX-PRIME

Una vez que las muestras de papel estuvieron libres de aceite, se procedió a la exploración. Para ello, cada muestra se introdujo en la cámara de vacío del microscopio.

A modo ilustrativo, en la Fig. 3 puede observarse el microscopio electrónico y el analizador, y en la Fig. 4 la cámara de vacío del centro de investigación CINDECA de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de la Plata que fueron utilizadas para el presente estudio.



Fig.3- Microscopio y Analizador

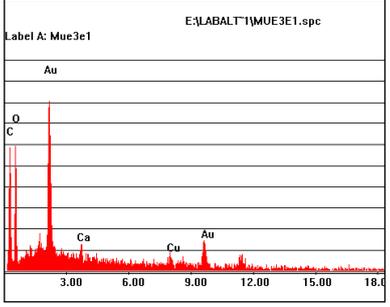
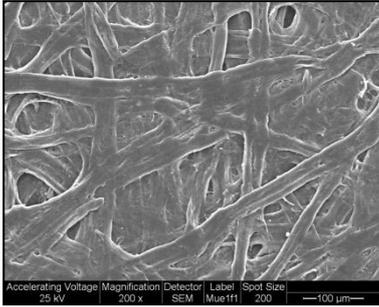
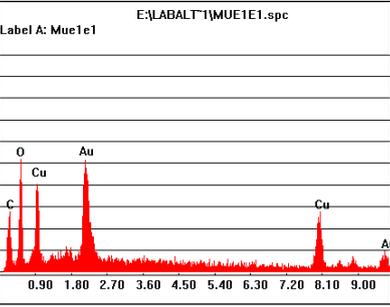
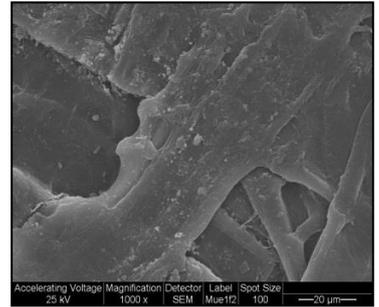
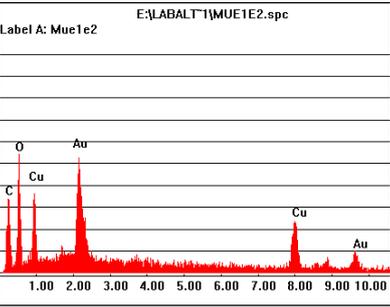
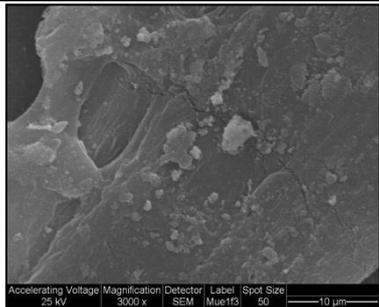
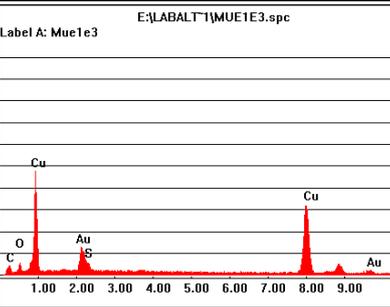


Fig.4- Cámara de vacío

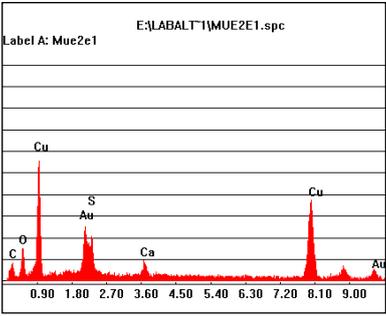
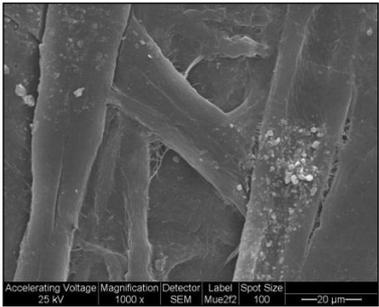
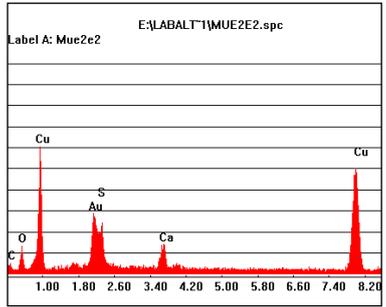
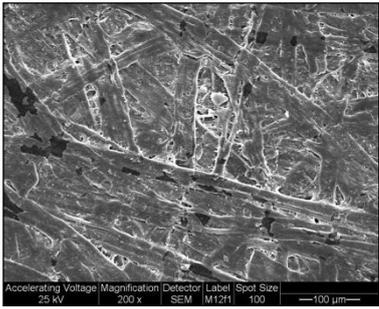
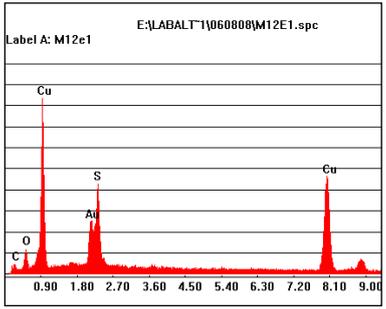
### 5. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE PAPELES

En la Tabla I se presentan muestras de papel extraídas del transformador fallado junto con la clasificación de la Fig. 1 y las fotografías obtenidas con el microscopio electrónico y los espectros de energía asociados.

**Tabla I- Muestras de papel analizadas**

Muestra	Clasificación	Fotografía SEM	Espectro EDX
<b>Nº 1</b> 	0		
<b>Nº 2</b> 	5		
			
			

**Tabla I - Muestras de papel analizadas (continuación)**

Muestra	Clasificación	Fotografía SEM	Espectro EDX
<p align="center"><b>N° 3</b></p> 	<p align="center">9</p>		
			
<p align="center"><b>N° 4</b></p> 	<p align="center">&gt;9</p>		

### 5.1 Observaciones

En la muestra N°1 no se distinguen fibras dañadas ni partículas extrañas. En el espectro de energía predominan el oro (Au), material de recubrimiento, y los componentes de la celulosa carbono (C) y oxígeno (O). No se logra distinguir bandas pertenecientes a cobre (Cu) ni a azufre (S). La banda de energía del Au es sumamente angosta.

La muestra N°2 tiene una coloración plateada catalogada 5 según [1]. La fotografía X200, muestra el mismo aspecto que la muestra N°1, sin embargo en el espectro de energía se identifica una banda perteneciente a Cu. Cuando se aumenta la magnificación a X1000 se distinguen partículas extrañas, el espectro de energía permanece similar a la anterior. Al aumentar nuevamente hasta X3000 concentrándose en las partículas extrañas, se aprecia en el espectro de energía, que la banda de Au se ensancha en la base, pudiendo deberse a la presencia de azufre.

La muestra N°3 presenta un aspecto rojizo plateado la cual puede ser catalogada 9 según [1]. Al observar las fotografías X200 y X1000 se distinguen partículas extrañas. En los espectros de energía de ambas magnificaciones aparecen claramente las bandas de los elementos Cu y S.

Por último, la muestra N°4 presenta el aspecto más oscuro de todas las analizadas. En la fotografía de magnificación X200 pueden verse fibras de la celulosa dañadas, en el espectro de energía resalta la presencia de Cu y de S, en forma más evidente que en las muestras antes analizadas.

## 5.2 Relación de masas

A través del software del equipo analizador de espectro EDX fue posible realizar una estimación de la proporción en masas de los elementos presentes en el espectro de energía estudiado. Concretamente, fue posible obtener el porcentaje en masa de los elementos S y Cu y de esta manera identificar la molécula de sulfuro cuproso.

En primer lugar se debe considerar el porcentaje en masa del S y del Cu en la molécula de sulfuro cuproso. La molécula de Cu<sub>2</sub>S está formada por dos átomos de cobre y uno de azufre, si las masas de estos elementos son, respectivamente:

$$M_{Cu} = 63,536 \text{ u} \text{ y } M_S = 32,065 \text{ u}$$

El porcentaje de masas en la molécula Cu<sub>2</sub>S será:

$$\%Cu = \frac{2M_{Cu}}{2M_{Cu} + M_S} \text{ y } \%S = \frac{M_S}{2M_{Cu} + M_S}$$

Esto significa que en una molécula Cu<sub>2</sub>S el 80 % de la masa corresponde al cobre y un 20 % al azufre.

En cinco muestras que se detectó contenido de cobre y azufre se midió la proporción de los elementos dando los resultados de la Tabla II.

**Tabla II-** Relación de masas medidas a partir del espectro de energía

Elemento	Muestra					Promedio
	A	B	C	D	E	
% Cu	81,0	83,9	77,9	77,4	80,4	<b>80,1</b>
% S	19,1	16,1	22,1	22,6	19,6	<b>19,9</b>

Los valores de la Tabla II indicarían que los compuestos de azufre y cobre encontrados en los papeles se presentan en proporciones tales a las moléculas de sulfuro cuproso.

## 6. CONCLUSIONES

La coloración evidenciada en muestras de papeles extraídas de un transformador fueron analizadas mediante la técnica de microscopía de barrido de electrones identificando la presencia del compuesto sulfuro cuproso (Cu<sub>2</sub>S).

Se encontró una correlación entre la identificación propuesta en la Fig. 1 [1], y la detección de compuestos de cobre o sulfuro, cuanto más oscuro era la coloración de los papeles más grande eran las bandas de energía del espectro tanto del cobre como del azufre.

La muestra más contaminada (N°4) presentó daño de las fibras de la celulosa.

El análisis realizado de las masas de los compuestos a partir de los espectros de energía corroboró que el compuesto presente en la superficie del papel era sulfuro cuproso.

Las técnicas EDX junto con SEM resultaron adecuadas para la identificación de la contaminación del papel por medio de la corrosión del cobre.



**Décimo Quinto Encuentro Regional  
Ibero-americano del CIGRÉ  
Foz de Iguazú-PR, Brasil  
19 al 23 de mayo de 2013**



**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] C. Bengtsson, M. Dahlund, J. Hajek, L.F. Pettersson, K. Gustafsson, R. Leandersson, A. Hjortsberg, “Oil Corrosion And Conducting Cu<sub>2</sub>S Deposition In Power Transformer Windings”, paper A2-111, CIGRÉ Main Session, 2006, Paris
- [2] Life Extension Guidelines and Best Practices Technical Content Update – 2006. Impact of Corrosive Sulfur on Substation Transformers.
- [3] TB 378 -Copper sulphide in transformer insulation - CIGRE WG A2.3 – Abril 2009.
- [4] Qian Yi-hua, Wang Yu, Hu Honq-honq, Yao Wei-jian, Li Zhi1 - Analysis and Treatment of Transformer Faults Caused by Corrosive Sulfur – CIGRE 2008. Technical Session 1 Distribution network equipment.