

# FALHAS CATASTRÓFICAS EM TRANSFORMADORES PROVOCADAS PELO SULFURETO DE COBRE. CAUSAS E SOLUÇÕES

M. AUGUSTA G. MARTINS

LABELEC–Grupo EDP - Departamento de Materiais Isolantes  
Rua Cidade de Goa n°4, 2685-039 Sacavém, Portugal  
maria.augusta@edp.pt

**ABSTRACT:** Copper Sulphide ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) deposition on the transformer windings (copper conductor and associated insulating paper) has recently led to catastrophic failures of transformers, in service.

The description of this problem and the main questions we need to answer, urgently, in order to solve, or at least to minimize it, are presented here.

The urgent need of “design” (formulation) of oils suitable for transformers for special applications and also the development of a new test method for the proper identification of the corrosive oils, susceptible to cause this type of failures, in transformers, are also referred.

Finally, the state of the art about the use of a copper passivator dissolved in oil, as a way to mitigate the problem of  $\text{Cu}_2\text{S}$  deposition, the several questions about the way it works and the role played in the passivator performance by several factors, are mentioned here, as well.

**Key words:** Copper Sulphide.  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Failure. Corrosive Sulphur. Insulating oil. Passivator. Irgamet 39. Insulating paper. Electrical fault. Transformer.

**RESUMO:** A deposição de sulfureto de cobre, no cobre e sobretudo no papel dos enrolamentos, tem sido referida como a causa de falhas catastróficas, ocorridas recentemente em transformadores.

É aqui apresentada uma caracterização do problema, e equacionadas as mais importantes questões, para as quais urge encontrar resposta, para a minimização daquele.

Com esta mesma finalidade, aborda-se a necessidade de desenvolvimento, não só de novos óleos para fazer face a este problema, mas também de uma adequada norma de ensaio, para a detecção, no óleo, do enxofre e compostos de enxofre potencialmente corrosivos. Tal Norma destinar-se-á a substituir as actualmente usadas nos ensaios de recepção de óleos novos, as quais se mostraram incapazes de, nesta nova situação, realizar uma triagem correcta, que permita separar os óleos adequados dos inadequados (relativamente a este parâmetro), para a sua utilização em transformadores.

Finalmente, refere-se a utilização de passivador dissolvido no óleo, (única solução, actualmente disponível, para mitigação deste problema), a forma como este actua, à luz dos conhecimentos actuais e as múltiplas dúvidas, levantadas pela presença, no óleo, deste novo aditivo.

**Palavras Chave:** Sulfureto de cobre.  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Enxofre corrosivo. Óleo isolante. Passivador. Irgamet 39. Papel isolante. Defeito eléctrico. Transformador.

## 1. INTRODUÇÃO

Várias falhas catastróficas, surgidas recentemente em transformadores de potência jovens, têm sido associadas à presença de **sulfureto de cobre**, depositado no cobre e no papel dos respectivos enrolamentos.

Estas falhas têm consistido em curto-circuitos violentos, entre espiras, normalmente pertencentes aos enrolamentos de alta tensão.

Da análise estatística das várias falhas deste tipo, conclui-se que estas têm incidido principalmente em transformadores novos, cuja análise pericial realizada na sequência do incidente e complementada com os testes de rotina,

efectuados ao longo do tempo de vida dos transformadores, até à ocorrência da avaria (testes estes que fazem parte da manutenção preventiva dos transformadores), permitiu considerar que, imediatamente antes da falha, tais transformadores, não apresentavam qualquer sintoma de defeito interno.

Os mesmos equipamentos cumpriam ainda todos os requisitos, a nível de “design” no que concerne ao projecto, assim como ao fabrico, (relativamente aos métodos de fabrico e materiais utilizados).

De entre os materiais utilizados no fabrico, destaca-se, pela sua importância, o óleo que, em todos esses casos, havia sido recepcionado por forma a garantir o cumprimento dos

requisitos estabelecidos na Norma CEI 60296 [1]<sup>(a)</sup>, ou equivalente.

Para além disso, todos os parâmetros do óleo em serviço obedeciam às especificações da Norma CEI 60422 [2], ou equivalente, encontrando-se também dentro da normalidade, todos os parâmetros de exploração do transformador (carga, tensão, transitórios, etc.).

Assim, estas falhas, que têm ocorrido recentemente em transformadores de diversos fabricantes, em serviço em diversos países, um pouco por todo o mundo (embora com uma maior incidência em “países quentes”), têm provocado um pânico generalizado, nas diversas empresas detentoras de transformadores.

Isto porque, é bastante preocupante o facto de não ter existido, até ao momento, um método de ensaio, que permitisse a detecção desta anomalia, num estágio incipiente do seu desenvolvimento, de forma a poder evitar a falha de grandes dimensões, que acaba por ocorrer e à qual se encontram sempre associados, elevadíssimos custos directos e indirectos.

Torna-se portanto urgente efectuar a caracterização técnica completa destas ocorrências, incluindo a compreensão das suas causas, de forma a poder encontrar a solução mais adequada para evitar tais falhas.

## 2. FACTORES DE RISCO

A ocorrência de falhas, cuja causa tem sido associada ao aparecimento de sulfureto de cobre, no cobre e principalmente no papel dos enrolamentos dos transformadores, tem sido associada aos seguintes **factores de risco**:

- **Transformadores geradores (Transformadores de Grupo)**, que são normalmente transformadores de potência de importância estratégica, cuja avaria põe em causa o funcionamento duma Central. Estes transformadores funcionam normalmente a temperaturas elevadas (essencialmente associadas a cargas mais elevadas).

Este tipo de falhas tem incidido principalmente em transformadores geradores, em funcionamento em climas quentes, mas também tem ocorrido em outros transformadores de muito alta tensão, assim como em rectificadores.

- **Transformadores sem respiração livre**, ou seja, com conservadores sem contacto directo do óleo com o ar, (munidos de membrana elástica, ou de uma almofada de azoto).
- **Óleos nafténicos** (embora o mesmo problema tenha já ocorrido com outros tipos de óleo, a incidência é sobretudo em óleos nafténicos).
- **Cobre nu** (não revestido de verniz), nos enrolamentos.

As causas da formação de sulfureto de cobre, no cobre e papel dos enrolamentos, assim como os factores que

controlam a cinética do processo, permanecem ainda praticamente desconhecidos.

Desconhece-se, por exemplo, a eventual dependência deste fenómeno de:

- **aspectos particulares do “design” (projecto) do transformador** (para além do conservador com membrana elástica, ou almofada de azoto).
- **materiais usados no fabrico** (para além do facto de se conhecer uma maior frequência de aparecimento deste defeito, em equipamentos cheios com óleos nafténicos e enrolamentos com cobre nu).
- **condições de serviço** (carga, tensão, etc.) do transformador.

De salientar que, tanto a análise dos gases dissolvidos no óleo, como qualquer outro ensaio de óleo, especificado nas Normas CEI 60422 [2], ou CEI 60296 [1] não consegue detectar este fenómeno, nos primeiros estádios do seu desenvolvimento.

Até mesmo nas situações em que, por acaso, estes testes ao óleo foram realizados imediatamente antes de ocorrer a falha, todos os valores obtidos eram normais, não evidenciando qualquer sintoma da presença de defeito.

## 3. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Existem no óleo (crude), diferentes tipos de compostos de enxofre, com diferentes graus de corrosividade, nomeadamente, [6]:

- O **enxofre elementar** (enxofre livre) e os **mercaptanos<sup>(b)</sup> (tióis)**, que são muito corrosivos (elevada reactividade).
- Os **tio-éteres<sup>(c)</sup>** que se podem considerar corrosivos.
- Os **di-tio-éteres<sup>(d)</sup>** que são estáveis.
- Os **tiofenos<sup>(e)</sup>** que apresentam uma estabilidade muito elevada, funcionando como inibidores de oxidação, naturais do óleo.

De entre todas as famílias de compostos de enxofre, a dos tiofenos é a que possui a maior estabilidade, ou seja, o menor grau de corrosividade para o cobre.

(a) A nível de detecção de enxofre, todos os óleos haviam sido classificados como “não corrosivos” nos ensaios de enxofre corrosivo, efectuados pelas Normas DIN 51353 [3], ASTM D 1275 [4], ou anteriormente à última revisão da Norma CEI 60296, pela Norma ISO 5662 [5].

(b) Mercaptanos - (R-SH).

(c) Tio-éteres - (R-S-R<sub>1</sub>).

(d) Di-tio-éteres - (R-S-S-R).

R e R<sub>1</sub> representam uma parafina de cadeia linear ou ramificada, ou um hidrocarboneto cíclico [6].

(e) Tiofenos (anel pentagonal contendo enxofre).

De referir que, existem múltiplos produtos de cada uma destas famílias, variando o seu grau de corrosividade, com a composição de cada um desses produtos. Por exemplo, [7]:

- A **corrosão, produzida por mercaptanos lineares**, decresce com o aumento do número de átomos de carbono da molécula.
- A **corrosão, produzida por mercaptanos com o mesmo número de átomos de carbono**, é maior para mercaptanos aromáticos, que para mercaptanos alifáticos.
- O **poder corrosivo do enxofre elementar** é 3,7 vezes maior que o correspondente ao etil-mercaptano, que é o mais corrosivo dos mercaptanos.
- A corrosão, produzida por **mercaptanos com 6 átomos de carbono** segue a seguinte ordem:

**Hexil mercaptano > ciclohexil mercaptano > tiofenol**

O processo de refinação do óleo tem por fim remover muitos dos compostos de enxofre corrosivos (enxofre elementar, mercaptanos e tio-éteres) presentes naquele, ou convertê-los em compostos mais estáveis (menos corrosivos), tais como os tiofenos.

Numa incompleta refinação, é normal deixar no óleo, pequenas quantidades de mercaptanos, podendo, por seu turno, o processo de hidrogenação produzir enxofre elementar, cuja presença no óleo é altamente indesejável.

À partida, poder-se-ia assim pensar que a resolução do problema da formação de sulfureto de cobre, passava simplesmente por se produzir um óleo livre de qualquer composto de enxofre.

Contudo, na refinação do óleo, nem todo o enxofre deve ser retirado deste, visto que, alguns dos compostos de enxofre actuam como inibidores de oxidação (inibidores naturais do óleo), reduzindo a posterior degradação deste.

Provavelmente, estes mesmos compostos de enxofre, não corrosivos, em determinadas condições, actualmente ainda mal definidas, podem originar outros compostos de enxofre muito corrosivos, como por exemplo os mercaptanos, ou outros ainda desconhecidos.

Por exemplo, foi verificado experimentalmente [7], que o enxofre não corrosivo, pode tornar-se corrosivo, após exposição a temperaturas elevadas, na presença de uma superfície quente de cobre, originando a produção de sulfureto de cobre.

Principalmente em ambientes com défice de oxigénio, (tais como os que se encontram em certos transformadores em que não há contacto entre o óleo e o ar), aumenta a probabilidade de ataque do cobre dos enrolamentos, pelos compostos de enxofre corrosivos. Tal ataque origina a formação de sulfuretos de cobre, que são visíveis através de manchas de cor negra, cinzenta de grafite ou castanha escura na superfície do cobre.

O maior problema dos sulfuretos está, no entanto, associado à sua presença no papel isolante.

Isto porque, as propriedades condutoras dos sulfuretos de cobre fazem com que a deposição destes, no papel isolante dos enrolamentos, provoque uma redução das propriedades dieléctricas do papel, nomeadamente uma redução da respectiva rigidez dieléctrica e um aumento do factor de dissipação dieléctrica, embora isto não esteja normalmente associado a qualquer redução da resistência mecânica do papel.

Tal pode ser confirmado, por exemplo, através da medição de valores bastante elevados do grau de polimerização viscosimétrico médio, em provetes de papel retirados da zona afectada do transformador e onde foi previamente confirmada por análise, a presença de sulfureto de cobre.

Este facto, verificado por nós no laboratório, tem sido também referido na literatura, em casos semelhantes [6].

Tornando o papel mais condutor, os sulfuretos provocam uma redução da tensão mínima necessária para a produção de descargas parciais, criando condições propícias para a ocorrência de um arco eléctrico violento, que usualmente surge entre espiras do enrolamento.

Finalmente, para além da deposição, no cobre e papel, o sulfureto de cobre pode ainda destacar-se da superfície daqueles, sob a forma de partículas, que podem também vir a funcionar como “núcleos”, para a produção de descargas eléctricas, no interior do transformador [8].

#### 4.DISTRIBUIÇÃO DO SULFURETO DE COBRE NOS ENROLAMENTOS

Estudos laboratoriais de vários óleos, levados a cabo pela ABB, na gama de temperaturas de 80 °C a 150 °C, [9] permitiram concluir que, para condições idênticas de ensaio, a deposição de sulfureto de cobre (Cu<sub>2</sub>S), só ocorre em certos óleos.

Verificou-se ainda que, a deposição de Cu<sub>2</sub>S dependia fortemente da concentração de oxigénio presente.

No que concerne à temperatura, a velocidade desta deposição duplicava aproximadamente, por cada 10 °C de subida de temperatura, [9].



**Fig. 1.** Pormenor dum enrolamento dum transformador (após desmontagem), com um defeito grave (arco eléctrico entre espiras), originado pela presença de sulfureto de cobre

Adicionalmente, foi constatado que, a espessura da camada de sulfureto de cobre, depositada sobre o condutor de cobre do enrolamento, aumenta à medida que a temperatura do óleo e do cobre aumentam.

Para além destes factores, por exemplo, também o campo eléctrico pode ter influência na reacção de formação de sulfureto de cobre nos enrolamentos [10], influência essa que ainda permanece desconhecida.

A actual dificuldade para explicar o complexo padrão de distribuição do  $\text{Cu}_2\text{S}$ , no cobre e papel dos enrolamentos, exclusivamente através do perfil de temperatura no enrolamento, poderá eventualmente ser ultrapassada, se tivermos em conta outros factores, como por exemplo, a distribuição espacial das concentrações de oxigénio no óleo, no papel e à superfície do condutor de cobre.

De facto, as descontinuidades verificadas na distribuição da concentração de  $\text{Cu}_2\text{S}$ , ao longo da superfície das várias camadas de papel dos enrolamentos, não podem ser explicadas exclusivamente pelo perfil de temperatura, que apresenta variações graduais, sem descontinuidades, [11].

A concentração de oxigénio, em cada ponto da superfície do cobre e do papel do enrolamento, não é contudo um parâmetro fácil de medir, uma vez que, depende de vários factores, tais como o fluxo do óleo nesse ponto e a espessura do papel e dos espaçadores, entre outros, [9].



**Fig. 2.** Barras de cobre dum enrolamento dum transformador, após arco eléctrico entre espiras originado pela presença de enxofre corrosivo

Também a influência, na formação de  $\text{Cu}_2\text{S}$ , do teor de água inicial no papel do enrolamento, começou a ser estudada, em experiências laboratoriais efectuadas com papel Kraft, com diferentes teores de água iniciais, os quais foram enrolados à volta do provete de cobre, sujeito a ensaio.

Desses estudos, concluiu-se que, a humidade presente no papel dos enrolamentos, parece não ter qualquer influência neste fenómeno, [9].

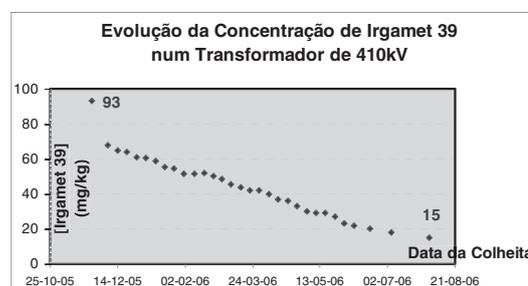
## 5. COMO MINIMIZAR O PROBLEMA

A principal fonte de enxofre corrosivo no transformador é o óleo, embora possam existir outras, tais como as borrachas de silicone e de nitrilo, (usadas por exemplo nas

mangueiras de óleo utilizadas no enchimento de transformadores), os fluorelastómeros tais como o VITON, (usado por exemplo nos “O” rings), as colas utilizadas no papel e cartão isolantes do transformador e até o cobre e o papel isolante,<sup>(a)</sup> onde o enxofre pode aparecer como impureza, [6].

Perante a extrema urgência de tomar medidas que evitem este problema, para além da substituição total do óleo, tem sido sugerido, pelos fabricantes daquele, a adição ao óleo, de um agente passivante, que minimize a corrosão do cobre, provocada pelos compostos de enxofre corrosivos, presentes no óleo.

A concentração do agente passivante (passivador), no óleo, recomendada pelos fabricantes deste, começou por ser de 100 ppm, (100mg/kg), embora actualmente o assunto permaneça em discussão, tendo em conta a inesperada variação de concentração de passivador no óleo, **verificada ao longo do tempo, em transformadores em serviço**, tal como se pode observar na Figura 3.



**Fig. 3.** Variação da concentração de passivador, num transformador de 410 kV, em serviço, a partir do valor inicial de 93ppm até um valor final de 15ppm, ao fim de cerca de 9 meses.

Sobre a adição do passivador ao óleo, permanecem contudo por esclarecer, algumas questões críticas, cuja resposta é cada vez mais premente; pelo que a sua enumeração se reveste de grande importância, designadamente:

- 1º - Qual a concentração de passivador no óleo, mais adequada para evitar a formação de sulfureto de cobre?
- 2º - Quais os efeitos colaterais adversos, (sobre o papel isolante, ou qualquer outro material, usado no fabrico de transformadores), a curto, médio e longo prazo, da presença de passivador, no óleo?

Uma vez que, na prática, se tem verificado um decréscimo, ao longo do tempo, da concentração de passivador, em óleos passivados de transformadores em serviço, isto também levanta outras questões, nomeadamente:

- 1º - Qual a concentração mínima, para a qual ainda não há problema de formação de sulfureto da cobre?
- 2º - Qual o verdadeiro mecanismo da passivação ?

(a)-Os compostos de enxofre são normalmente utilizados nas operações de lixiviação do papel.

Será a “cobertura” da superfície de cobre, pelas moléculas de passivador, um processo lento, que se desenvolve ao longo do tempo?

- 3º - Que factores influenciam a velocidade deste processo?
- 4º - Será o passivador em parte adsorvido no papel e/ou eventualmente em outros materiais do transformador, sendo também essa adsorção um processo lento, que ocorre ao longo do tempo?
- 5º - Qual a estabilidade térmica do passivador, às temperaturas de funcionamento do transformador?

Encontram-se actualmente em curso, experiências laboratoriais, com vista a responder a esta questão.

- 6º - Qual o papel desempenhado pela humidade e oxigénio dissolvidos no óleo, na eventual decomposição do passivador.
- 7º - Caso haja decomposição do passivador, ou reacção deste com alguns dos materiais com os quais o óleo se encontra em contacto, (papel, tintas, vernizes, colas), os produtos formados terão algum efeito adverso sobre o cobre e/ou papel dos enrolamentos? Quais os factores que controlam tais reacções?
- 8º - Qual o efeito do campo eléctrico, tensão e eventuais transitórios, nos fenómenos anteriormente referidos?
- 9º - Porque razão, em determinados transformadores, a presença de passivador, origina um acréscimo significativo dos gases dissolvidos no óleo (hidrogénio, hidrocarbonetos e óxidos de carbono)?
- 10º - O tipo de construção do transformador (shell, ou core), influenciará, a velocidade de decréscimo inicial da concentração de passivador?

Para responder a estas e outras questões, haverá que realizar uma profunda investigação neste domínio, para o que foram recentemente criados, a nível internacional, grupos de trabalho específicos, liderados pela Comissão Electrotécnica Internacional (CEI), pelo Conseil International des Grands Réseaux Electriques, (CIGRÉ) e pela Doble (EUA), com a participação de especialistas de diversos países.

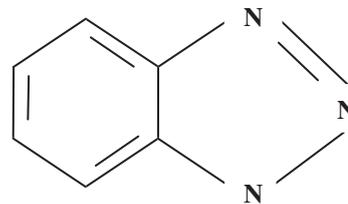
A completa identificação de todas as fontes de enxofre potencialmente corrosivo e a adequada monitorização da concentração deste, no óleo, através dum método de ensaio credível e internacionalmente validado, traduzir-se-á noutra importante contribuição para a resolução deste problema.

## 6. PASSIVADOR E SUA ACCÇÃO

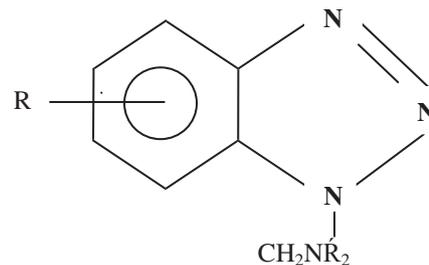
Existem diferentes tipos de substâncias passivadoras do cobre, susceptíveis de poderem ser adicionadas ao óleo, tais como produtos derivados do benzotriazole ( $C_6H_5N_3$ ), normalmente designado por BTA, sendo um dos mais utilizados actualmente, o **Irgamet 39, da Ciba-Geigy**, que, ao contrário do BTA, é facilmente solúvel no óleo.

Este produto é uma mistura de dois derivados alquilados do toluiltriazole (designadamente o N-N-bis(2-etilhexil)-4-metil-1-benzotriazole-1-metilamina, e o N-N-bis(2-etilhexil)-

5-metil-1-benzotriazole-1-metilamina), cuja fórmula estrutural é apresentada a seguir e onde R e R representam cadeias de hidrocarbonetos.



Benzotriazole (BTA)



Irgamet 39

Tanto quanto presentemente se sabe, as moléculas de passivador, ao distribuir-se pela superfície do cobre, formam uma película protectora, que evita, ou melhor minimiza, a corrosão do cobre, por ataque do ião sulfureto e portanto a formação de iões cobre que, na presença de iões sulfureto, iriam produzir o sulfureto de cobre [10], cuja formação consequentemente o passivador inibe.

## 7. PESQUISA DE NOVOS MÉTODOS DE ENSAIO DO ENXOFRE CORROSIVO

Desde há muito que o ensaio de detecção do enxofre corrosivo, faz parte do conjunto de ensaios de recepção de óleos novos, (quando da aquisição destes e portanto antes do enchimento do transformador), sendo um ensaio essencial para a aprovação de qualquer óleo, para a sua utilização em transformadores.

Assim, a Norma CEI 60296, durante muitos anos, especificou a Norma ISO 5662 para a realização deste ensaio.

Na última revisão da Norma CEI 60296, realizada em 2003, a Norma de detecção de enxofre e compostos de enxofre corrosivos (ISO 5662) foi substituída pela Norma DIN 51353 (baseada numa lâmina de prata, em vez de cobre usado na Norma ISO 5662), por se considerar, nesse momento, a norma DIN mais sensível que a Norma ISO.

Actualmente, nenhuma destas Normas, ou qualquer outra existente para a detecção do enxofre corrosivo, (tal como a ASTM D 1275) consegue realizar uma adequada triagem de óleos, de forma a separar os óleos susceptíveis de causar a formação de  $Cu_2S$ , no interior do transformador.

Por esta razão, intensa investigação tem sido efectuada com vista ao estabelecimento dum novo método de ensaio, que a curto prazo se irá converter em Norma CEI.

## 8. NECESSIDADE DE “FORMULAÇÃO” E FABRICO DE “NOVOS” ÓLEOS

Até muito recentemente, a maior preocupação na especificação e conseqüentemente na formulação de um óleo, para cumprir essa especificação, era garantir uma elevada estabilidade à oxidação deste. Em óleos não inibidos, tal característica exige uma adequada refinação, de forma a que o óleo final possua certos compostos de enxofre, que funcionam como inibidores naturais da oxidação.

Na tentativa de minorar a degradação do óleo por oxidação, os fabricantes de transformadores alteraram o “design” destes, de transformadores com respiração livre, para transformadores com conservador munido de uma membrana elástica, ou uma almofada de azoto, que restringe o contacto do ar com o óleo.

Tem sido essencialmente nestes transformadores, onde se tem registado, com maior frequência, os incidentes causados pela presença de enxofre corrosivo.

No que respeita ao óleo, haverá todo o interesse, em desenvolver para estas situações, óleos que correspondam a uma solução de compromisso, entre uma elevada estabilidade à oxidação e uma muito baixa concentração de enxofre corrosivo.

Isto pode ser presentemente conseguido com a utilização de óleos ultra refinados (que possuem uma muito baixa concentração de compostos de enxofre corrosivos), aos quais, no próprio processo de fabrico, são adicionados anti-oxidantes (inibidores de oxidação), com o fim de restaurar a estabilidade à oxidação, (uma vez que a perda dos inibidores naturais, na refinação, provoca um significativo decréscimo da estabilidade à oxidação).

Esta é a solução actualmente disponível, mas que poderá ser bastante melhorada no futuro, com o desenvolvimento de óleos, especialmente adequados para determinadas utilizações especiais.

Apesar da muito baixa concentração de compostos de enxofre, no óleo ultra-refinado, o ataque desses compostos de enxofre corrosivos, eventualmente presentes no óleo, ao cobre existente no interior do transformador, pode ainda ser minimizado, pela adição dum passivador ao óleo.

A presença de passivador no óleo, e sua formulação química deve, no entanto, ser obrigatoriamente declarada ao cliente, pelo fornecedor do óleo, no momento da transacção.

Isto é muito importante porque, entre outras razões, os óleos passivados de origem, deverão ser submetidos a um ensaio de estabilidade à oxidação, especialmente adaptado a esta nova realidade.

Para além do novo método de detecção do enxofre corrosivo, aquele é outro dos métodos que haverá que rever a curto prazo, para adaptação da respectiva Norma, à sua aplicação a óleos passivados.

## 9. CONCLUSÃO

O complexo problema associado ao aparecimento de sulfureto de cobre, no cobre e papel dos enrolamentos dos transformadores, que tem sido considerado como causa das recentes e imprevisíveis falhas catastróficas em transformadores, com os associados elevadíssimos custos directos e indirectos, justifica a necessidade de uma caracterização dos diversos aspectos deste problema.

A par do procedimento de recurso, para mitigação deste problema, recentemente recomendado pelos fabricantes de óleo e baseado na adição a este, de um passivador, apresenta-se um levantamento das questões mais importantes suscitadas por tal procedimento e que terão de ser respondidas, a curto prazo.

Para além do conhecimento do verdadeiro mecanismo de actuação do passivador, é ainda salientada a imprescindibilidade do rápido desenvolvimento de um método adequado para a especificação e análise, no óleo, dos compostos de enxofre potencialmente corrosivos, de procedimentos para parar, ou pelo menos retardar, o aparecimento do sulfureto de cobre, assim como do desenvolvimento de uma nova filosofia de “customização” de óleos, de forma a responder a necessidades de funcionamento específicas e diferenciadas.

Finalmente, salienta-se que estes desenvolvimentos, incluindo a obtenção de respostas às questões formuladas, passarão pela realização de um trabalho de pesquisa interdisciplinar, que já se encontra em curso, com a colaboração de fabricantes de óleo, fabricantes e utilizadores de transformadores, para além de especialistas no domínio da química analítica e da manutenção preventiva de transformadores.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma CEI 60296. “Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear”. Third edition, Nov. 2003.
- [2] Norma CEI 60422. “Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance”. Third edition – October, 2005.
- [3] Norma DIN 51353. “Detection of corrosive sulphur”. December, 1985.
- [4] Norma ASTM D 1275. “Standard test method for corrosive sulfur in electrical insulating oils”, 2006.
- [5] Norma ISO 5662. “Petroleum products – Electrical insulating oils – Detection of corrosive sulphur. Second edition 1997.

- [6] Lewand, L.R. – “The role of corrosive sulfur in transformer oil”. - Doble Engineering Company. 2002.
- [7] Garcia-Antón, J; Monzó, J.; Guiñón, J.L. – “Effect of elemental sulphur and mercaptans on copper strip corrosion and use of the ASTM D 130 test method”. Corrosion Engineering – pg. 558-566, July, 1995.
- [8] Wilson, A.C.M. – “Insulating Liquids: Their uses, manufacture and properties” – IEEE, New York and UK, 1980.
- [9] Bengtsson C; Dahlund, M; Hajek, J; Petterson, L.F.; Gustafsson, K; Leandersson, R.; Hjortsberg, Arne – “Oil corrosion and conducting  $\text{Cu}_2\text{S}$  deposition in power transformer windings”. A2-111. CIGRÉ, 2006.
- [10] Rocha, A.H. – “Faults in 500 kV shunt reactors caused by corrosive sulphur in the insulating oil” – Doble Client Conference - Preliminary Paper 5D, 2001.
- [11] Castle, J.E; Whitfield, Ali M. – “The transport of copper through oil impregnated paper insulation in electrical current transformers and bushings” – IEEE Electrical Insulation Magazine - Vol 19 n° 1, pg. 25-29, Jan/Feb, 2003.