

Influencia de las Condiciones Ambientales en los Mecanismos de Corrosión de Materiales  
Metálicos Empleados en Data Centers

Elkin Efren Torres Olarte

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Dario Yesid Peña Ballesteros

Ph.D. en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

*Primero que todo, quiero darle gracias a la vida por permitirme culminar un nuevo logro.*

*A mis padres, Celedonio y Esperanza, por ser el apoyo absoluto durante toda mi vida y, especialmente, durante mi carrera universitaria, donde, sin importar cuántas caídas hubo, siempre estuvieron para motivarme a seguir adelante. Espero que este nuevo logro los haga sentir orgullosos del hombre que forjaron.*

*A mi hermana Tatiana, por siempre tener una palabra de aliento en los momentos en que pensé que ya no podía más.*

*A mi hermano Freddy, por siempre confiar en mí y en que podía lograr todo lo que me propusiera.*

*Al amor, porque sin amor las cosas cuestan el triple, y es imprescindible contar con unos brazos a los que acudir cuando todo se nubla...*

*A la amistad. Gastaría un montón de espacio si nombrara a todos, pero sepan que siempre están en mi corazón y en mis buenos deseos. De igual manera, me resulta importante mencionar a Esmeralda, gracias por ser esa persona que siempre estuvo presente, tanto en el ámbito académico como en el personal. A Vanessa, por ser la amiga todoterreno; a Maxi, por ser la mejor amistad que me pudo otorgar la universidad; a Keyla, por hacer más llevaderos los últimos semestres de la carrera; y a Sebastián, por ser la única amistad que conservo desde el primer semestre. Y a los muchos más amigos universitarios con los que compartí a lo largo de este camino.*

*A mis michis, los que me acompañan actualmente y los que ya cruzaron el arcoíris. Sepan que aprecié infinitamente su compañía en este mundo terrenal. Gracias por estar sobre mi escritorio en aquellas tardes de clases virtuales, por estar a mi lado mientras me trasnochaba estudiando y por pasar sobre el teclado mientras escribía este libro.*

### **Agradecimientos**

*A la Universidad Industrial de Santander, por abrirme sus puertas y brindarme una formación integral que trascendió lo estrictamente académico. Durante estos años, sus aulas, laboratorios y espacios fueron escenario de aprendizajes, retos y experiencias que contribuyeron a mi crecimiento profesional y personal. La UIS no solo me proporcionó las herramientas técnicas e investigativas necesarias para afrontar los desafíos de la ingeniería, sino que también fortaleció mi carácter, disciplina y capacidad de resiliencia. Hoy culmino esta etapa con profundo orgullo y gratitud, llevando conmigo el sello de excelencia de esta institución.*

*Un agradecimiento muy especial al profesor Darío, cuyo acompañamiento fue fundamental para el desarrollo y culminación de este proyecto de grado. Su experiencia, orientación y rigor académico fortalecieron cada etapa de este trabajo. Más allá de sus valiosos aportes técnicos, agradezco profundamente su calidad humana, paciencia y constante disposición para escuchar y orientar. Gracias por creer en este proyecto y por compartir generosamente su conocimiento. A todos los profesores, técnicos de laboratorio y administrativos que hicieron parte de mi formación, gracias por su dedicación, compromiso y apoyo. Sus conocimientos, experiencia y trabajo contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico y profesional.*

*Asimismo, agradezco las enseñanzas, consejos y palabras de aliento que, más allá de lo técnico, dejaron una huella valiosa en mi proceso de formación.*

*Finalmente, agradezco a todas las personas que formaron parte de mi recorrido en esta institución. Las amistades construidas, los desafíos superados y los aprendizajes adquiridos hicieron de este camino una experiencia enriquecedora e inolvidable. Me despido de esta etapa con gratitud y satisfacción, consciente de que este logro también refleja el apoyo y la guía de quienes me acompañaron durante estos años.*

### Tabla de contenido

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción.....                                                                                                                                  | 10 |
| 1. Planteamiento y Fundamentación Teórica.....                                                                                                     | 11 |
| 1.1. Justificación .....                                                                                                                           | 11 |
| 1.2. Limitaciones del estudio .....                                                                                                                | 11 |
| 1.3. Objetivos.....                                                                                                                                | 12 |
| 1.3.1. Objetivo general: .....                                                                                                                     | 12 |
| 1.3.2. Objetivos específicos:.....                                                                                                                 | 12 |
| 1.4. Marco Teórico y Estado del Arte .....                                                                                                         | 13 |
| 1.4.1. Evolución de la electrónica: De aleaciones Sn-Pb a soldaduras libres de plomo.<br>.....                                                     | 13 |
| 1.4.2. Clasificación de la severidad ambiental según ANSI/ISA-71.04-2013.....                                                                      | 13 |
| 1.4.3. Estándares ASHRAE para el diseño térmico y de contaminantes.....                                                                            | 14 |
| 1.4.4. Termodinámica y cinética de la corrosión atmosférica en metales nobles y<br>base. ....                                                      | 15 |
| 2. Metodología.....                                                                                                                                | 16 |
| 3. Caracterización del Ambiente en Data Centers y Agentes Contaminantes .....                                                                      | 17 |
| 3.1 Impacto de los economizadores de aire ( <i>Free Cooling</i> ) en la entrada de<br>contaminantes. ....                                          | 17 |
| 3.2. Contaminantes gaseosos: Sinergia entre H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> .....                            | 18 |
| 3.3. Contaminantes particulados: Sales deliquescentes y polvos metálicos. ....                                                                     | 19 |
| 3.4. Influencia de la humedad relativa y los ciclos térmicos en la formación de la capa<br>de electrolito. ....                                    | 21 |
| 3.5 Condiciones ambientales más relevantes para la corrosión .....                                                                                 | 22 |
| 4. Mecanismos de Corrosión en Tarjetas de Circuito Impreso (PCB) y Componentes<br>Electrónicos.....                                                | 23 |
| 4.1. Corrosión por fluencia ( <i>Creep Corrosion</i> ): Sulfuración del cobre y migración sobre<br>acabados de plata (ImAg). ....                  | 23 |
| 4.2. Migración Electroquímica (ECM): Cinética del crecimiento dendrítico bajo campos<br>eléctricos.....                                            | 25 |
| 4.3. Corrosión galvánica y por picaduras en acabados ENIG ( <i>Electroless Nickel<br/>Immersion Gold</i> ). ....                                   | 27 |
| 4.4. Análisis de fallos en contactos eléctricos no permanentes. ....                                                                               | 28 |
| 5. Comportamiento Metalúrgico de las Soldaduras Libres de Plomo ( <i>Lead-Free</i> ) .....                                                         | 30 |
| 5.1. Microestructura de las aleaciones Sn–Ag–Cu (SAC) y formación de intermetálicos<br>(Ag <sub>3</sub> Sn, Cu <sub>6</sub> Sn <sub>5</sub> )..... | 30 |
| 5.2. Efecto del enfriamiento y la orientación de grano en la resistencia a la corrosión. ....                                                      | 32 |
| 5.3. Influencia de elementos de adición (Bi, Sb, Ag) en la estabilidad electroquímica. .                                                           | 33 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6. Corrosión en Sistemas de Enfriamiento e Infraestructura .....                                            | 34 |
| 6.1. Corrosión en tuberías de cobre: ataque <i>ant-nest</i> e interfase aleta-tubo. ....                    | 34 |
| 6.2. Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) en condensadores.....                                   | 36 |
| 7. Estrategias para el Control y Mitigación de la Corrosión en Centros de Datos .....                       | 38 |
| 7.1. Monitoreo reactivo mediante cupones de cobre y plata.....                                              | 38 |
| 7.2. Recubrimientos conformales ( <i>Conformal Coating</i> ): Efectividad frente a la humedad y gases. .... | 40 |
| 7.3. Filtración química y control de presurización en salas de servidores. ....                             | 41 |
| 7.4. Selección de materiales y diseño de acabados superficiales robustos. ....                              | 42 |
| 7.5. Aleaciones de alta entropía (HEA) aplicadas a la electrónica.....                                      | 43 |
| 8. Conclusiones .....                                                                                       | 44 |
| 9. Recomendaciones.....                                                                                     | 45 |
| Referencias Bibliográficas .....                                                                            | 47 |

### Lista de Figuras

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Velocidad de corrosión de la plata en función de la humedad relativa. ....                                                    | 15 |
| <b>Figura 2.</b> Esquema de un economizador del lado del aire (air-side economizer). ....                                                      | 18 |
| <b>Figura 3.</b> Análisis morfológico mediante SEM de partículas de polvo recolectadas en servidores de un data center. ....                   | 21 |
| <b>Figura 4.</b> Pérdida de espesor de la plata y variación de la humedad relativa en función del tiempo. ....                                 | 22 |
| <b>Figura 5.</b> PCB con corrosión por fluencia acelerada. ....                                                                                | 25 |
| <b>Figura 6.</b> Resultados de microscopía electrónica de barrido (SEM) de la placa de circuito impreso. ....                                  | 25 |
| <b>Figura 7.</b> Micrografías SEM de la morfología de dendritas de cobre bajo diferentes niveles de corriente. ....                            | 27 |
| <b>Figura 8.</b> Análisis de la picadura (pitting) en un acabado ENIG mediante FIB-SEM/EDS. ....                                               | 28 |
| <b>Figura 9.</b> Mecanismo de corrosión galvánica en acabados ENIG. ....                                                                       | 29 |
| <b>Figura 10.</b> Sección transversal de un defecto puntual (pinhole) en la capa de oro de un terminal ENIG. ....                              | 30 |
| <b>Figura 11.</b> Micrografía SEM de la aleación SAC305 y detalle de los precipitados intermetálicos. ....                                     | 31 |
| <b>Figura 12.</b> Micrografías ópticas de la superficie interna de un tubo de cobre con corrosión "ant-nest". ....                             | 35 |
| <b>Figura 13.</b> Micrografías SEM del tubo de cobre fallido con grietas ramificadas y picado pinhole. ....                                    | 36 |
| <b>Figura 14.</b> Tubo de cobre de un intercambiador de calor con corrosión localizada en las huellas dejadas por las aletas de aluminio. .... | 36 |
| <b>Figura 15.</b> Micrografía óptica de la sección transversal de un tubo de cobre de condensador. ....                                        | 37 |
| <b>Figura 16.</b> Micrografía SEM de la fractura tras limpieza ultrasónica. ....                                                               | 38 |
| <b>Figura 17.</b> Apariencia macroscópica de cupones de Cu y Ag tras exposición. ....                                                          | 39 |
| <b>Figura 18.</b> Corrosión por fluencia en un pad de PCB: daño que los recubrimientos conformales buscan prevenir. ....                       | 41 |
| <b>Figura 19.</b> Acabados ENIG. ....                                                                                                          | 43 |
| <b>Figura 20.</b> Interfase de reacción entre soldadura SAC305 y un sustrato de aleación de alta entropía (HEA). ....                          | 44 |

**Lista de Tablas**

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabla 1.</b> Clasificación de la severidad ambiental para equipos electrónicos. ....           | 14 |
| <b>Tabla 2.</b> Principales contaminantes gaseosos en data centers y su impacto metalúrgico. .... | 19 |
| <b>Tabla 3.</b> Síntesis de condiciones ambientales críticas y su impacto en la corrosión. ....   | 23 |
| <b>Tabla 4.</b> Resultados del análisis espectral del tubo de cobre agrietado n.º 2 (%wt) .....   | 38 |

## Resumen

**Título:** Influencia de las Condiciones Ambientales en los Mecanismos de Corrosión de Materiales Metálicos Empleados en Data Centers\*

**Autor:** Elkin Efren Torres Olarte\*\*

**Palabras clave:** Corrosión atmosférica, centros de datos, corrosión por fluencia, migración electroquímica, soldaduras libres de plomo, contaminantes gaseosos.

**Descripción:** La búsqueda de eficiencia energética en los centros de datos ha impulsado el uso de economizadores de aire y la ampliación de los rangos de temperatura y humedad, exponiendo el hardware y la infraestructura de climatización a contaminantes gaseosos y particulados que incrementan el riesgo de corrosión. Este trabajo analiza, desde una perspectiva metalúrgica, la influencia de las condiciones ambientales sobre los mecanismos de corrosión de los materiales metálicos empleados en estas instalaciones. Se desarrolló una investigación documental descriptiva y explicativa, mediante la revisión de 32 documentos: artículos experimentales, casos de fallo y normas técnicas (ANSI/ISA-71.04-2013 y ASHRAE TC 9.9). Los resultados muestran que las condiciones más agresivas combinan humedad relativa elevada, temperaturas moderadas y gases ácidos ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  y  $Cl_2$ ) en concentraciones del orden de partes por billón, junto con partículas delicuescentes que forman una capa delgada de electrolito sobre el metal. En los componentes electrónicos activan la corrosión por fluencia (*creep corrosion*) del cobre y la plata, la migración electroquímica con formación de dendritas, la corrosión galvánica y por picaduras en los acabados ENIG y la sulfuración de los contactos no permanentes; en las soldaduras SAC, los intermetálicos  $Ag_3Sn$  y  $Cu_6Sn_5$  favorecen la disolución selectiva del estaño. En la infraestructura de enfriamiento se identificaron la corrosión tipo "nido de hormigas" en las tuberías de cobre, la corrosión localizada en la interfase aleta-tubo y el agrietamiento por corrosión bajo tensión en condensadores. Finalmente, se describen las estrategias de mitigación reportadas: monitoreo con cupones de cobre y plata, recubrimientos conformales de epoxi, filtración química, presurización positiva y acabados robustos como el ENEPIG. Se concluye que la corrosión en los centros de datos es un fenómeno multifactorial cuya prevención exige una estrategia integral: control de la calidad del aire, selección adecuada de materiales y monitoreo continuo de la severidad ambiental.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.  
Director: Dario Yesid Peña Ballesteros. Doctor en Corrosión

### Abstract

**Title:** Influence of Environmental Conditions on the Corrosion Mechanisms of Metallic Materials Used in Data Centers.

**Keywords:** Atmospheric corrosion, data centers, creep corrosion, electrochemical migration, lead-free solders, gaseous contaminants.

**Description:** The pursuit of energy efficiency in data centers has driven the adoption of air-side economizers and the widening of temperature and humidity ranges, exposing the hardware and the cooling infrastructure to gaseous and particulate contaminants that increase the risk of corrosion. This work analyzes, from a metallurgical perspective, the influence of environmental conditions on the corrosion mechanisms of the metallic materials used in these facilities. A descriptive and explanatory documentary research was conducted through the review of 32 documents: experimental articles, failure case studies, and technical standards (ANSI/ISA-71.04-2013 and ASHRAE TC 9.9). The results show that the most aggressive conditions combine high relative humidity, moderate temperatures, and acid gases ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , and  $\text{Cl}_2$ ) at concentrations on the order of parts per billion, together with deliquescent particles that form a thin electrolyte layer on the metal. In electronic components, these conditions activate creep corrosion of copper and silver, electrochemical migration with dendrite formation, galvanic and pitting corrosion in ENIG finishes, and the sulfidation of non-permanent contacts; in SAC solders, the  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  and  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  intermetallics promote the selective dissolution of tin. In the cooling infrastructure, ant-nest corrosion in copper tubes, localized corrosion at the fin-tube interface, and stress corrosion cracking in condensers were identified. Finally, the mitigation strategies reported in the literature are described: reactive monitoring with copper and silver coupons, epoxy conformal coatings, chemical filtration, positive pressurization, and robust surface finishes such as ENEPIG. It is concluded that corrosion in data centers is a multifactorial phenomenon whose prevention requires an integral strategy: control of air quality, appropriate selection of materials, and continuous monitoring of environmental severity.

---

\*Undergraduate Thesis

\*\*Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.  
Director: Dario Yesid Peña Ballesteros. PhD in Corrosion

## Introducción

Los centros de datos son infraestructuras críticas cuya confiabilidad depende de las condiciones ambientales de operación. La búsqueda de eficiencia energética ha impulsado el uso de aire exterior y el ensanchamiento de los rangos de temperatura y humedad (ASHRAE TC 9.9, 2011), incrementando la exposición de los equipos electrónicos y de los sistemas de enfriamiento a contaminantes gaseosos y particulados, lo que genera ambientes con mayor potencial corrosivo (Muller, 2016). Los economizadores de aire (*airside economizers*) son una de las principales vías de ingreso de agentes agresivos a las salas de servidores, como se detalla en el capítulo 3.

La corrosión afecta tanto a los materiales de las tarjetas de circuito impreso (PCB), conectores y soldaduras, cobre, plata y aleaciones libres de plomo, como a la infraestructura de climatización. A diferencia de otros entornos industriales, puede ocurrir incluso bajo condiciones benignas, por la alta sensibilidad de estos materiales a bajas concentraciones de sulfuros, cloruros y óxidos de nitrógeno combinados con humedad moderada (Zhang et al., 2020). Estos ambientes inducen mecanismos de corrosión específicos: en la electrónica, la sulfidación de la plata, la corrosión atmosférica del cobre, la migración electroquímica (ECM) y la corrosión por fluencia (*creep corrosion*) (Fu et al., 2018); en la infraestructura de enfriamiento, la corrosión de los componentes de cobre y el agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) (Cozzarini et al., 2020). Estos fenómenos provocan cortocircuitos, pérdida de eficiencia térmica y fugas de refrigerante, con altos costos de mantenimiento; los capítulos 4, 5 y 6 los analizan en detalle.

A pesar del número creciente de revisiones sobre el tema (Saini et al., 2022), persiste la necesidad de integrar sistemáticamente la información sobre condiciones ambientales, mecanismos de corrosión y materiales afectados, tanto en la electrónica como en la infraestructura, desde una perspectiva metalúrgica. Este trabajo analiza dicha influencia

mediante la revisión de literatura científica especializada, apoyándose en marcos como la norma ANSI/ISA-71.04-2013, que evalúa la severidad corrosiva a partir de la tasa de corrosión de cupones de cobre y plata.

## **1. Planteamiento y Fundamentación Teórica**

### **1.1. Justificación**

Esta investigación busca equilibrar la eficiencia energética de los centros de datos con la integridad de su hardware e infraestructura. La adopción del *free cooling* y el ensanchamiento de los rangos térmicos (ASHRAE TC 9.9, 2011) han aumentado el ingreso de contaminantes y expuesto una vulnerabilidad no prevista (Le et al., 2022). La transición a tecnologías RoHS alteró el comportamiento electroquímico de uniones y acabados: las soldaduras Sn-Ag-Cu y los acabados de plata por inmersión son mucho más susceptibles a la corrosión por fluencia y la sulfidación que el Sn-Pb tradicional (Muller, 2016). A ello se suma que la miniaturización reduce el margen de tolerancia al fallo y que los sistemas de enfriamiento pueden provocar paradas no programadas. Por tanto, se justifica sintetizar el estado del arte metalúrgico para fundamentar las medidas de protección y monitoreo (Saini et al., 2022) descritas en el capítulo 7.

### **1.2. Limitaciones del estudio**

Es una investigación documental descriptiva y explicativa, centrada exclusivamente en centros de datos que emplean sistemas de enfriamiento por aire (especialmente los que usan economizadores de aire exterior), por lo que quedan excluidos del análisis directo otros métodos de climatización. Sus conclusiones dependen de la calidad y el alcance de los estudios primarios revisados, en su mayoría de laboratorio o casos de fallo, por lo que su extrapolación debe hacerse con precaución; además, la rápida evolución de los materiales y de los sistemas de enfriamiento puede desactualizar parcialmente algunas referencias.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general:**

Analizar la influencia de las condiciones ambientales en los mecanismos de corrosión que afectan los materiales metálicos utilizados en data centers.

#### **1.3.2. Objetivos específicos:**

Determinar las condiciones ambientales presentes en los data centers que favorecen la corrosión de los materiales metálicos utilizados en equipos electrónicos e infraestructura de los data centers.

Analizar los principales mecanismos de corrosión que afectan los materiales metálicos empleados en data centers, a partir de la revisión de estudios experimentales y casos de falla reportados en la literatura.

Describir las posibles estrategias reportadas en la literatura para la reducción de los fenómenos de corrosión en materiales metálicos utilizados en data centers.

## 1.4. Marco Teórico y Estado del Arte

### 1.4.1. Evolución de la electrónica: De aleaciones Sn-Pb a soldaduras libres de plomo.

La metalurgia de las interconexiones electrónicas experimentó un cambio de paradigma a partir de 2006 con la entrada en vigor de la directiva RoHS de la Unión Europea, la cual restringió el uso de plomo debido a su toxicidad ambiental y dio lugar a nuevos problemas de corrosión en equipos electrónicos previamente considerados benignos (Rathish et al., 2019). Históricamente, la soldadura eutéctica de estaño-plomo (Sn-Pb) fue el estándar de la industria por su excelente ductilidad, bajo punto de fusión y resistencia intrínseca a la formación de filamentos metálicos (*whiskers*). No obstante, su reemplazo por sistemas basados principalmente en estaño-plata-cobre (SAC) introdujo desafíos críticos en la confiabilidad de los equipos: estas nuevas aleaciones presentan una mayor fragilidad mecánica y una susceptibilidad química superior ante contaminantes atmosféricos, lo que ha exacerbado los fallos por corrosión en infraestructuras modernas (Muller, 2016). Como se verá en el capítulo 5, la microestructura de las aleaciones SAC y la formación de compuestos intermetálicos ( $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ) son determinantes en su comportamiento frente a ambientes agresivos.

### 1.4.2. Clasificación de la severidad ambiental según ANSI/ISA-71.04-2013.

Para cuantificar el riesgo de fallo en entornos de procesamiento de datos, la norma ANSI/ISA-71.04-2013 proporciona un marco de clasificación basado en la tasa de corrosión observada en cupones reactivos de cobre y plata expuestos durante 30 días. Esta normativa define niveles de severidad (G1, G2, G3 y GX) que correlacionan el crecimiento de la película de corrosión (medido en angstroms, Å) con la probabilidad de fallo del hardware. El nivel G1 corresponde al ambiente controlado que ASHRAE recomienda para la operación segura de la electrónica (ASHRAE TC 9.9, 2011); los niveles G2 y superiores indican una presencia de

gases ácidos que puede derivar en mecanismos de degradación acelerada si no se implementan medidas de filtración química (Awe et al., 2020). La *Tabla 1* resume dicha clasificación.

**Tabla 1.**

*Clasificación de la severidad ambiental para equipos electrónicos.*

| Clase de Severidad | Cobre (Å/30 días) | Plata (Å/30 días) | Entorno                                        |
|--------------------|-------------------|-------------------|------------------------------------------------|
| G1 (Leve)          | <300              | <200              | Ambiente bien controlado; bajo riesgo.         |
| G2 (Moderada)      | 300-1000          | 200-1000          | Corrosión medible; riesgo moderado.            |
| G3 (Alta)          | 1000-2000         | 1000-2000         | Ambiente hostil; alta probabilidad de fallo.   |
| GX (Severa)        | >2000             | >2000             | Entorno extremo; requiere protección especial. |

**Nota.** La clasificación de severidad se define formalmente a partir de la reactividad del cobre; el umbral de plata de la clase G1 (<200 Å) está reportado por la norma y por Muller (2016), mientras que las franjas de plata para G2, G3 y GX se presentan como una extrapolación indicativa, en paralelo a las del cobre. Adaptado de ANSI/ISA-71.04-2013 y Muller (2016).

De manera complementaria y como marco científico global, la evaluación de estos ambientes se rige por la norma ISO 11844 (Corrosión de metales y aleaciones - Clasificación de la baja corrosividad en atmósferas de interiores). Esta normativa internacional complementa a la norma ISA al clasificar los espacios cerrados en cinco categorías (desde IC 1, muy baja corrosividad, hasta IC 5, alta corrosividad en interiores), fundamentándose en la pérdida de masa o el incremento de espesor de películas de corrosión sobre metales estándar, así como en la caracterización de parámetros ambientales críticos (humedad, temperatura y contaminantes). Su integración en el análisis de data centers permite validar las mediciones de campo bajo un estándar universal de degradación de metales en interiores.

#### 1.4.3. Estándares ASHRAE para el diseño térmico y de contaminantes.

El Comité Técnico 9.9 de ASHRAE ha establecido las directrices fundamentales para la gestión térmica en centros de datos, definiendo rangos de operación "recomendados" y "permitidos" para temperatura y humedad (ASHRAE TC 9.9, 2011). En la búsqueda de eficiencia energética, los operadores recurren al uso de economizadores de aire (enfriamiento

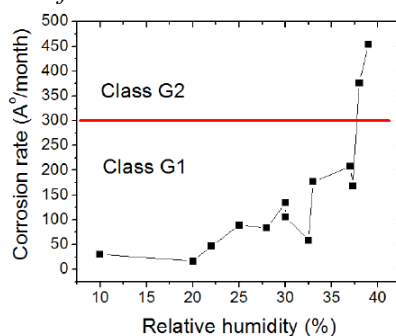
gratuito), lo que incrementa la exposición del hardware a contaminantes gaseosos y particulados externos (Saini et al., 2022). ASHRAE enfatiza que la expansión de estos rangos térmicos debe ir acompañada de un control riguroso de la calidad del aire, ya que la sinergia entre la alta humedad y los contaminantes gaseosos es el principal detonante de los fallos del hardware. En el capítulo 3 se analiza con detalle cómo los economizadores de aire actúan como vectores de ingreso de agentes corrosivos y cómo la humedad relativa y los ciclos térmicos favorecen la formación de la capa delgada de electrolito (TEL).

#### 1.4.4. Termodinámica y cinética de la corrosión atmosférica en metales nobles y base.

La corrosión de metales como el cobre y la plata en interiores es un proceso electroquímico gobernado por la formación de una capa delgada de electrolito (TEL) sobre la superficie, cuya estabilidad depende de la humedad relativa, como se presenta en la Figura 1 (Klein et al., 2011). Termodinámicamente, la adsorción de gases como el  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{Cl}_2$  facilita la formación de productos de corrosión (sulfuros, óxidos y cloruros) que crecen siguiendo cinéticas lineales o parabólicas según la agresividad del medio. Se ha documentado que la plata es extremadamente sensible a la formación de sulfuros incluso en concentraciones de traza, mientras que la degradación del cobre se acelera significativamente ante la presencia de humedad y compuestos clorados, comprometiendo la continuidad eléctrica de las pistas y contactos (Zhang et al., 2020).

##### **Figura 1.**

*Velocidad de corrosión de la plata en función de la humedad relativa.*



**Nota.** Se ilustra la existencia de una humedad relativa crítica a partir de la cual la velocidad de corrosión de la plata aumenta de manera no lineal, debido a la formación de una película continua de agua sobre la superficie

(TEL), el incremento de la conductividad iónica y la aceleración de las reacciones de sulfuración. Adaptado de Klein et al. (2011), "Corrosion Management for Data Centers", Fig. 4, p. 5.

## 2. Metodología

El trabajo se desarrolló como una investigación documental de nivel descriptivo y explicativo, sobre la influencia de las condiciones ambientales en la corrosión de los materiales metálicos de los data centers.

**2.1. Definición del problema y fundamentación teórica.** Se identificó el problema de corrosión en data centers que emplean economizadores de aire y rangos térmicos ampliados; se delimitó el alcance, los materiales de interés (cobre, plata, soldaduras SAC) y el enfoque metalúrgico.

**2.2. Búsqueda de documentos relevantes.** Se consultaron bases de datos académicas (IEEE Xplore, ScienceDirect, ASME, MDPI, SpringerLink), priorizando artículos de investigación, revisiones, normas técnicas y casos de falla, con descriptores como "*data center corrosion*" y "*creep corrosion*", complementados con la técnica de bola de nieve.

**2.3. Evaluación y organización de la información.** Se seleccionaron 32 documentos de alta calidad (2009-2026) con datos experimentales, análisis microestructurales o casos de fallo, clasificados según cada objetivo: condiciones ambientales (cap. 3), mecanismos en PCB y soldaduras (caps. 4 y 5), infraestructura de climatización (cap. 6) y estrategias de mitigación (cap. 7).

**2.4. Análisis de la literatura.** Se realizó un análisis cualitativo y comparativo de los datos técnicos (tasas de corrosión, espesores de película, morfologías de ataque y condiciones experimentales), elaborando tablas de síntesis y figuras representativas, respetando la atribución de las fuentes.

**2.5. Interpretación y limitaciones.** Se identificaron tendencias y sinergias entre contaminantes, humedad y temperatura, y las limitaciones de los estudios primarios (condiciones de laboratorio y gases acelerados), reconocidas en la introducción.

### 3. Caracterización del Ambiente en Data Centers y Agentes Contaminantes

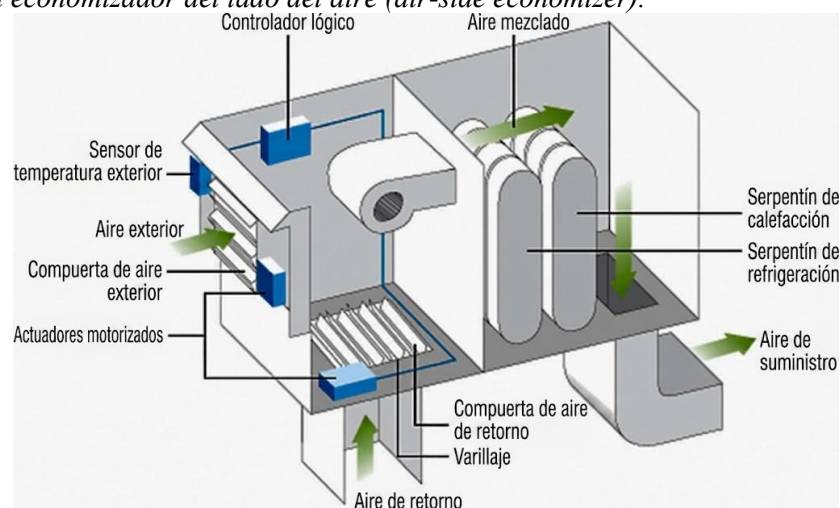
#### 3.1 Impacto de los economizadores de aire (*Free Cooling*) en la entrada de contaminantes.

El uso de economizadores de aire, conocidos técnicamente como *air-side economizers*, se ha consolidado como la estrategia predilecta para reducir el consumo energético (PUE) en los centros de datos modernos, permitiendo alcanzar valores de eficiencia tan bajos como 1,05 (Le et al., 2022). Esta técnica consiste en introducir aire exterior directamente a la sala de servidores cuando las condiciones climáticas lo permiten, minimizando el uso de enfriadores mecánicos (*chillers*). Sin embargo, este flujo masivo de aire actúa como el principal vector para el ingreso de agentes corrosivos. Si bien el ahorro energético es significativo, la falta de una barrera física hermética expone los componentes a fluctuaciones críticas de humedad y temperatura, así como a contaminantes que no estaban presentes en los sistemas tradicionales de recirculación cerrada (Awe et al., 2020). Este fenómeno afecta tanto a la electrónica como a los sistemas de enfriamiento, cuyos fallos se analizan en los capítulos 4 y 6 respectivamente.

La vulnerabilidad se acentúa en regiones con climas tropicales o alta actividad industrial, donde el aire exterior transporta concentraciones elevadas de gases ácidos como  $H_2S$  y  $SO_2$ , además de partículas sólidas. Los estudios experimentales en entornos con economizadores operativos demuestran que la exposición continua al aire exterior, incluso dentro de los rangos de temperatura permitidos por ASHRAE, conduce a una acumulación progresiva de productos de corrosión en las superficies metálicas (Shah et al., 2017). Como se ilustra en el esquema del proceso de mezcla de aire en la Figura 2, el diseño del sistema fuerza una interacción directa entre el ambiente exterior y la microelectrónica del servidor, lo que convierte a la calidad del aire en el factor determinante de la vida útil del hardware (Saini et al., 2022). Esta interacción también favorece la entrada de partículas que, como se verá en la sección 3.3, pueden depositarse y activar mecanismos de corrosión localizada.

**Figura 2.**

*Esquema de un economizador del lado del aire (air-side economizer).*



**Nota.** Se muestran la entrada de aire exterior, su mezcla con el aire de retorno y el flujo resultante hacia los servidores, junto con los serpentines de calentamiento/enfriamiento y los dampers de control. Adaptado de Saini et al. (2022), "Effects of Gaseous and Particulate Contaminants on IT Equipment Reliability: A Review", Fig. 2, p. 3

### 3.2. Contaminantes gaseosos: Sinergia entre $\text{H}_2\text{S}$ , $\text{SO}_2$ , $\text{NO}_2$ , $\text{Cl}_2$

La degradación atmosférica de los componentes metálicos en los centros de datos no es el resultado de la acción aislada de un gas, sino de un fenómeno complejo de sinergia química entre contaminantes ácidos y oxidantes. La literatura técnica identifica al sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y el cloro gaseoso ( $\text{Cl}_2$ ) como los principales agentes responsables de la pérdida de continuidad eléctrica (Zhang et al., 2018). El  $\text{H}_2\text{S}$  es particularmente agresivo con la plata ( $\text{Ag}$ ), reaccionando incluso en concentraciones de partes por billón (ppb) para formar sulfuro de plata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), una película semiconductor que aumenta la resistencia de contacto. Por otro lado, el cobre ( $\text{Cu}$ ) es extremadamente susceptible al  $\text{H}_2\text{S}$  y al  $\text{SO}_2$ , pero su tasa de corrosión se dispara cuando estos gases coexisten con el  $\text{NO}_2$  y el  $\text{O}_3$ , los cuales actúan como catalizadores u oxidantes que acidifican la capa delgada de electrolito (TEL), facilitando una disolución anódica más rápida (Saini et al., 2022).

La combinación de estos gases genera un efecto multiplicador en la cinética de corrosión. Estudios experimentales realizados bajo condiciones de flujo de gases mezclados (*Mixed Flowing Gas, MFG*) demuestran que la tasa de corrosión del cobre en una mezcla de  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{NO}_2$  es significativamente mayor que la suma de las tasas de corrosión de cada gas por

separado (Zhang et al., 2020). Este comportamiento sinérgico es crítico en ambientes urbanos e industriales con emisiones vehiculares y fabriles; asimismo, en zonas costeras la deposición de cloruros marinos acelera la corrosión de las metalizaciones de las PCB (Feng et al., 2019).

La Tabla 2 resume las concentraciones típicas y los efectos específicos de estos contaminantes en la metalurgia de los servidores, destacando cómo concentraciones aparentemente ínfimas pueden inducir fallos por la formación de sales complejas y productos de sulfuración no protectores (ASHRAE TC 9.9, 2011). Nótese que el cloro gaseoso, además de afectar al cobre, también acelera la corrosión por picaduras de los intercambiadores de calor, tema que se retoma en el capítulo 6.

**Tabla 2.**

*Principales contaminantes gaseosos en data centers y su impacto metalúrgico.*

| Contaminante                    | Concentración típica en exterior (ppb) | Fuente principal                        | Impacto principal                                                                     | Material más afectado       |
|---------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Sulfuro de Hidrógeno ( $H_2S$ ) | 4-140                                  | Procesos industriales, alcantarillado.  | Formación de sulfuros densos; <i>Creep corrosion</i> . Acidificación del electrolito; | Plata (Ag) y Cobre (Cu).    |
| Dióxido de Azufre ( $SO_2$ )    | 4-40                                   | Combustión de combustibles fósiles.     | corrosión galvánica.                                                                  | Cobre (Cu).                 |
| Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ ) | 5-80                                   | Emisiones vehiculares (motores diesel). | Agente oxidante; acelera la sulfuración.                                              | Plata (Ag) y Cobre (Cu).    |
| Cloro Gaseoso ( $Cl_2$ )        | 1-10                                   | Cercanía al mar, limpieza industrial.   | Picaduras ( <i>pitting</i> ) y ruptura de capas pasivas.                              | Cobre (Cu) y Aluminio (Al). |

**Nota.** Elaboración propia. Las concentraciones típicas en exterior provienen de Saini et al. (2022), Tabla 1, p. 3 (datos de ASHRAE RFP 1755-TRP); los impactos metalúrgicos se compilaron a partir de Saini et al. (2022) y Zhang et al. (2020).

### 3.3. Contaminantes particulados: Sales delicuescentes y polvos metálicos.

La contaminación por material particulado representa una amenaza física y química latente para la microelectrónica de los servidores, cuya severidad se ha incrementado con el uso de sistemas de enfriamiento por aire exterior. A diferencia de los gases, las partículas se depositan sobre las tarjetas de circuito impreso (PCB) mediante mecanismos de sedimentación, impacto inercial o atracción electrostática, acumulándose en los espacios críticos entre

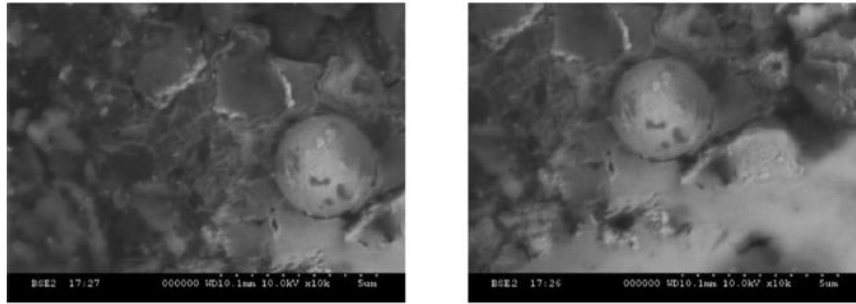
componentes miniaturizados (Shah et al., 2019). Estos contaminantes se dividen principalmente en partículas no iónicas, que pueden causar sobrecalentamiento al obstruir el flujo de aire, y partículas iónicas o metálicas, que son las más críticas desde la perspectiva de la corrosión. Las sales deliquescentes, como los sulfatos, cloruros y nitratos, poseen la capacidad de absorber humedad del ambiente, reduciendo drásticamente la resistencia de aislamiento superficial (SIR) de los sustratos (Saini et al., 2022).

El riesgo metalúrgico de estas partículas está regido por su Humedad Relativa de Deliquesencia (DRH). Cuando la humedad del centro de datos supera este umbral específico, la partícula sólida absorbe vapor de agua hasta disolverse y formar una gota de electrolito altamente concentrado y conductivo sobre la superficie de la PCB (Awe et al., 2020). Este fenómeno crea las condiciones ideales para la migración electroquímica (ECM), incluso si el ambiente general se mantiene dentro de los límites de humedad recomendados (Lu et al., 2024).

Asimismo, el ingreso de polvos metálicos provenientes de procesos de desgaste o de la propia construcción del edificio puede generar puentes conductores directos entre pistas de diferentes potenciales, provocando fallos por cortocircuito o arcos eléctricos. Como se analiza en la caracterización morfológica de contaminantes reales (Figura 3), la diversidad de tamaño y composición del polvo en data centers con economizadores exige un control de filtración mucho más riguroso que en los sistemas cerrados tradicionales (Shah et al., 2019). En el capítulo 4 se explica cómo estos depósitos participan activamente en la corrosión por fluencia y en la migración electroquímica.

**Figura 3.**

*Análisis morfológico mediante SEM de partículas de polvo recolectadas en servidores de un data center.*



**Nota.** Caracterización morfológica por microscopía electrónica de barrido (SEM) de partículas de polvo recolectadas en servidores de un data center con economizadores de aire: (a) imágenes de electrones retrodispersados (BSE,  $\times 10k$ ) y (b) electrones secundarios (SE,  $\times 500$ ), donde se aprecia la diversidad de tamaños y formas. Tomado de Shah et al. (2019), "Identification and Characterization of Particulate Contaminants Found at a Data Center Using Airside Economization", Fig. 9, p. 4.

### **3.4. Influencia de la humedad relativa y los ciclos térmicos en la formación de la capa de electrolito.**

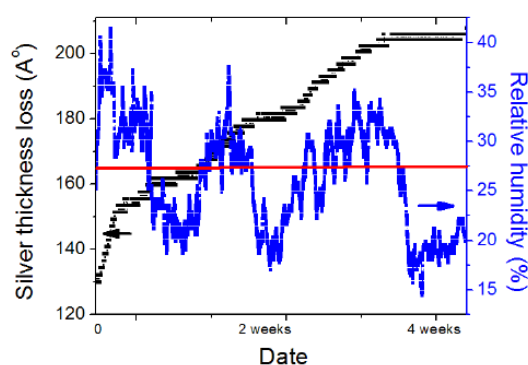
La humedad relativa (HR) es el parámetro ambiental más crítico para la tasa de corrosión atmosférica, pues actúa como disolvente de los contaminantes gaseosos y medio de transporte de los iones metálicos. Al aumentar la HR, la adsorción de moléculas de agua sobre las superficies metálicas forma la capa delgada de electrolito (TEL). La Humedad Relativa Crítica (HRC) es el umbral a partir del cual esta capa (generalmente de 3 a 5 monocapas de agua) permite una conducción iónica significativa que desencadena la corrosión acelerada (Zhang et al., 2020). En los centros de datos, los ciclos térmicos derivados de las variaciones de carga de los servidores provocan cambios bruscos en la HR local; si un componente desciende por debajo del punto de rocío, se produce condensación líquida que engrosa la TEL y activa la corrosión galvánica y por picaduras (Huang et al., 2020).

La relación entre la HR y la degradación de la plata no es lineal: por debajo de una HR crítica ( $\sim 27\%$ ) la pérdida de metal se mantiene casi constante, mientras que por encima progresa de forma sostenida, como muestra el seguimiento temporal de la Figura 4 (Klein et al., 2011). Además, los rangos térmicos expandidos sin un control riguroso de la HR permiten que los productos de corrosión higroscópicos absorban humedad en condiciones antes

consideradas seguras (ASHRAE TC 9.9, 2011): los cloruros depositados sobre las pistas se vuelven iónicamente conductores a HR bajas, la DRH de algunas sales de cloruro está por debajo del 40 %, manteniendo activa la celda galvánica y la migración electroquímica aun cuando el ambiente parece seco (Saini et al., 2022). Por ello, la gestión del punto de rocío es tan importante como la filtración de gases. Estos conceptos sustentan los mecanismos de los capítulos 4 (ECM) y 6 (intercambiadores de calor).

**Figura 4.**

*Pérdida de espesor de la plata y variación de la humedad relativa en función del tiempo.*



**Nota.** Evolución temporal de la pérdida de espesor de la plata (eje izquierdo) y de la humedad relativa (eje derecho) en un centro de datos. La línea roja indica el umbral de humedad relativa (~27 %) por debajo del cual la pérdida de metal se mantiene constante. Tomado de Klein et al. (2011), "Corrosion Management for Data Centers", Fig. 3, p. 4.

### 3.5 Condiciones ambientales más relevantes para la corrosión

La integridad de los materiales metálicos en los centros de datos no depende de una variable aislada, sino de la sinergia entre los parámetros térmicos, los contaminantes gaseosos y el material particulado. Aunque los estándares de ASHRAE definen un "envolvente térmico" de operación segura (ASHRAE TC 9.9, 2011), la adopción de economizadores de aire y de la normativa RoHS con soldaduras libres de plomo (SAC) y acabados de plata por inmersión (ImAg) ha reducido los márgenes de tolerancia, convirtiendo condiciones antes consideradas "moderadas" en entornos de alto riesgo de fallo (Muller, 2016). La Tabla 3 sistematiza estas condiciones, contrastando los rangos recomendados con los umbrales críticos: en síntesis, mantener la humedad relativa por debajo del 60 % y los gases ácidos en niveles G1 es esencial para la fiabilidad, pero los centros con economizadores a menudo superan estos límites (Shah et al., 2017), lo que justifica las estrategias de mitigación del capítulo 7. Caracterizadas así las

condiciones ambientales, el capítulo 4 analiza cómo actúan sobre los materiales de las PCB mediante la corrosión por fluencia, la migración electroquímica, la corrosión galvánica en acabados ENIG y los fallos en contactos no permanentes.

**Tabla 3.**

*Síntesis de condiciones ambientales críticas y su impacto en la corrosión.*

| Factor Ambiental       | Rango Recomendado (ASHRAE/ISA)                       | Umbral Crítico de Corrosión                                            | Impacto Mecanismo Principal                                                                                       |
|------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Temperatura            | 18 °C a 27°C                                         | >28°C (con contaminantes)                                              | Acelera la reactividad química; sin embargo, temperaturas altas pueden reducir la adsorción de gases en Cu.       |
| Humedad Relativa (HR)  | 20% a 60%                                            | 70% a 80%                                                              | Formación de la capa de electrolito (TEL); activa la migración electroquímica (ECM) y el <i>creep corrosion</i> . |
| Punto de Rocío         | 5.5°C a 15°C                                         | Variaciones >14°C                                                      | La inestabilidad térmica provoca condensación microscópica, disparando las tasas de corrosión local.              |
| Contaminantes Gaseosos | ISA Clase G1<br>(Cu < 300 Å/mes)<br>(Ag < 200 Å/mes) | $H_2S > 3$ ppb<br>$SO_2 > 10$ ppb<br>$NO_2 > 50$ ppb<br>$Cl_2 > 1$ ppb | Sinergia ácida/oxidante; el $H_2S$ domina la corrosión de la plata, y el $H_2S$ , $SO_2$ y $Cl_2$ la del cobre.   |
| Material Particulado   | ISO 14644-1 Clase 8                                  | Partículas iónicas con DRH < 60%                                       | Sales deliquescentes que absorben humedad y crean puentes conductores; riesgo de <i>whiskers</i> de zinc.         |
| Flujo de Aire          | Filtración MERV 11 / 13                              | Velocidades que impiden la sedimentación                               | El alto volumen de aire en ASE incrementa la exposición acumulativa a gases y partículas finas (PM2.5).           |

**Nota.** Elaboración propia a partir de ASHRAE TC 9.9 (2011), ANSI/ISA-71.04-2013, Klein et al. (2011), Zhang et al. (2020) y Saini et al. (2022). Los umbrales de gases corresponden a los límites de la clase G1 de la norma ANSI/ISA-71.04-2013, según Saini et al. (2022), Tabla 2, p. 3.

#### 4. Mecanismos de Corrosión en Tarjetas de Circuito Impreso (PCB) y Componentes

##### Electrónicos

#### 4.1. Corrosión por fluencia (*Creep Corrosion*): Sulfuración del cobre y migración sobre acabados de plata (ImAg).

La corrosión por fluencia (*creep corrosion*) es uno de los fallos de confiabilidad más críticos de la microelectrónica actual: se manifiesta como el crecimiento y desplazamiento de

productos de corrosión sólidos sobre superficies dieléctricas. A diferencia de la corrosión atmosférica convencional, implica un transporte de masa activo, pues el producto de la reacción predominantemente sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), no permanece en el sitio de ataque, sino que migra sobre la máscara de soldadura (*solder mask*). La transición a acabados de plata por inmersión (*ImAg*) bajo la normativa RoHS ha agravado el fenómeno, ya que la plata facilita una interfase galvánica con el cobre subyacente en las porosidades o discontinuidades del recubrimiento (Muller, 2016).

Termodinámicamente, el mecanismo lo impulsa la alta afinidad entre el cobre y las especies de azufre (especialmente  $\text{H}_2\text{S}$ ) en presencia de una capa delgada de electrolito (TEL): en la base de los poros del acabado, el cobre se oxida y sus iones reaccionan con el gas sulfuroso disuelto (Huang et al., 2020). El  $\text{Cu}_2\text{S}$  resultante actúa como un compuesto semiconductor de baja adherencia, cuya expansión voluminosa es asistida por capilaridad en la interfase máscara-metal; su migración depende de la energía superficial del sustrato y de la humedad local. La tasa de fluencia se dispara cuando la humedad supera el 60 %, permitiendo que el sulfuro colonice las áreas aislantes, reduzca la resistencia de aislamiento superficial (SIR) y provoque cortocircuitos por puentes conductores (Zhang et al., 2020). Este comportamiento se potencia con las condiciones descritas en el capítulo 3, especialmente el  $\text{H}_2\text{S}$  y la HR elevada.

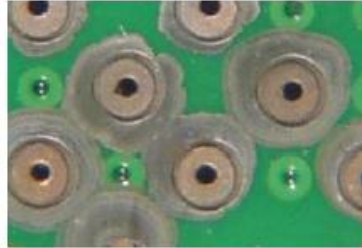
Morfológicamente, la observación por SEM revela que el ataque no es dendrítico, sino crecimientos ramificados y densos de tipo coralino. En ensayos acelerados en cámara FOS, la sulfuración se reproduce sobre pistas y *pads* y tiende a iniciarse donde el metal base queda expuesto, como en los electrodos de plata de las resistencias de chip (Figura 5); el análisis EDS confirma azufre y cobre, con trazas de cloro que catalizan la picadura inicial (Fu et al., 2018).

En sección transversal, el daño incluye la fluencia del  $\text{Cu}_2\text{S}$  y un hueco en el acabado que se extiende hacia el cobre (Figura 6), abriendo una vía para la migración de iones de cobre

que compromete la integridad eléctrica y mecánica de la unión (Fu et al., 2015). En el capítulo 5 se analiza cómo la microestructura de las soldaduras SAC influye en esta susceptibilidad.

**Figura 5.**

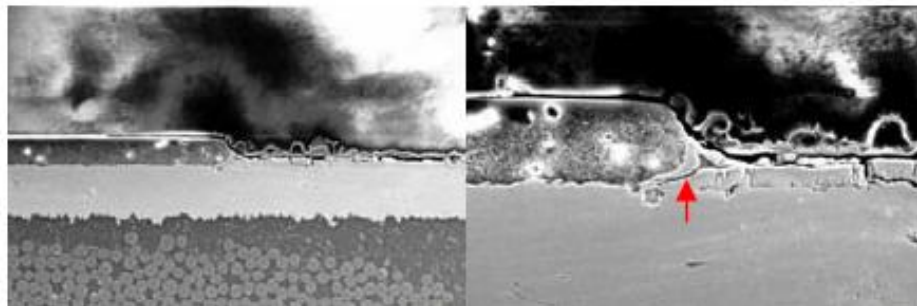
*PCB con corrosión por fluencia acelerada.*



**Nota.** Fotografía de una placa de circuito impreso con corrosión por fluencia (*creep corrosion*) tras exposición acelerada en cámara de flores de azufre (FOS) a 60 °C y 82 % de HR. Se observan productos de corrosión claros (ricos en cloruros) que crecen y migran de forma radial alrededor de los pads sobre la máscara de soldadura, reproduciendo el daño observado en fallos de campo. Tomado de Fu et al. (2018), "Testing Printed Circuit Boards for Creep Corrosion in Flowers of Sulfur Chamber", p. 8.

**Figura 6.**

*Resultados de microscopía electrónica de barrido (SEM) de la placa de circuito impreso.*



**Nota.** Micrografía SEM en sección transversal de una PCB con acabado ENIG tras 10 días de exposición en cámara de flores de azufre (FOS). Se observa la fluencia del sulfuro de cobre sobre la superficie y un hueco en la capa del acabado que se extiende hacia el cobre (señalado con la flecha roja), el cual facilita la migración de iones de cobre. Tomado de Fu et al. (2015), "Creep Corrosion Failure Analysis on ENIG Printed Circuit Boards", Fig. 5, p. 125.

#### **4.2. Migración Electroquímica (ECM): Cinética del crecimiento dendrítico bajo campos eléctricos.**

La migración electroquímica (ECM) es una degradación por transporte de masa que ocurre bajo un campo eléctrico en presencia de una capa delgada de humedad o condensación; a diferencia de otros mecanismos atmosféricos, requiere obligatoriamente una diferencia de potencial entre dos conductores adyacentes. El proceso se desarrolla en tres etapas: (i) disolución anódica del metal (cobre, plata o estaño); (ii) transporte de los iones a través del electrolito hacia el cátodo, impulsado por el campo; y (iii) reducción y deposición en el cátodo,

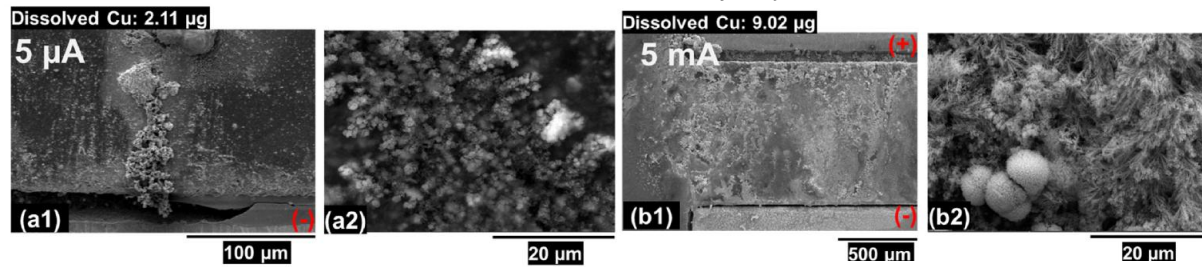
que origina estructuras ramificadas (dendritas) que crecen hacia el ánodo hasta cerrar un puente conductor y provocar un cortocircuito (Rao et al., 2026).

La cinética del crecimiento dendrítico está ligada a la estabilidad de la TEL y a los contaminantes iónicos. El material particulado fino actúa como catalizador, pues las sales higroscópicas del polvo reducen la humedad relativa crítica necesaria para formar una película de agua continua (Saini et al., 2022), y los ensayos en aleaciones libres de plomo contaminadas con polvo confirman que dichas sales aceleran la formación de dendritas (Lu et al., 2024). Una vez establecido el camino electrolítico, la velocidad de crecimiento depende de la densidad de corriente y la sobretensión: la corriente de fuga aumenta varios órdenes de magnitud en cuanto se alcanza el punto de deliquesencia de los contaminantes, marcando el inicio de la migración iónica masiva (Rao et al., 2026). Esta dependencia de la humedad y las partículas se relaciona con las secciones 3.3 y 3.4.

La miniaturización agrava el fenómeno al aumentar el gradiente de potencial ( $V/d$ ): al reducirse las distancias entre pistas, el campo se intensifica incluso a voltajes bajos, acelerando la disolución y acortando el tiempo de cierre del circuito. En cobre, la morfología depende del nivel de corriente a través de la TEL: corrientes bajas producen dendritas metálicas finas y bien definidas, mientras que corrientes altas impulsadas por contaminantes iónicos generan dendritas gruesas y ramificadas, ricas en óxidos e hidróxidos de cobre formados por el gradiente de pH local de la hidrólisis (Rao et al., 2026); la aparición de estos crecimientos sobre el cobre se observa en la Figura 7. Esta transición compromete la integridad eléctrica y aumenta el riesgo de arcos y calentamiento resistivo. El fenómeno no es exclusivo del cobre: también se ha caracterizado en soldaduras Sn-Ag (Zhou et al., 2025) y en sistemas SAC, cuya susceptibilidad depende de los compuestos intermetálicos presentes (Li et al., 2018). En el capítulo 5 se aborda cómo las aleaciones SAC modifican su respuesta a la ECM según su microestructura y composición.

**Figura 7.**

*Micrografías SEM de la morfología de dendritas de cobre bajo diferentes niveles de corriente.*



**Nota.** Micrografías SEM de la morfología de dendritas de cobre formadas bajo dos niveles de corriente: a 5  $\mu\text{A}$  (paneles a1 y a2) se obtienen dendritas metálicas finas y bien definidas, mientras que a 5 mA (paneles b1 y b2) las dendritas son gruesas y ramificadas, con mayor contenido de óxidos de cobre. Se muestran únicamente las micrografías SEM; la figura original incluye además los mapas EDX de Cu y O. Adaptado de Rao et al. (2026), "Investigation of kinetics of ECM dendrite growth during corrosion in electronics", Fig. 9, p. 9.

### 4.3. Corrosión galvánica y por picaduras en acabados ENIG (*Electroless Nickel Immersion Gold*).

El acabado de níquel químico / oro por inmersión (ENIG) es muy usado en electrónica por su planicidad y su protección durante los ciclos térmicos de soldadura. Consiste en una capa de níquel-fósforo (Ni-P) autocatalítica, que actúa como barrera de difusión, recubierta por una capa delgada de oro (Au) por inmersión. Sin embargo, esta arquitectura introduce una vulnerabilidad electroquímica intrínseca por la gran diferencia de potencial entre el oro (catódico, noble) y el níquel (anódico, activo). Si la capa de oro presenta discontinuidades, poros, grietas o defectos de fabricación documentados como vías de acceso al sustrato en placas ENIG (Fu et al., 2015), se establece una celda galvánica que expone el níquel: en presencia de una TEL, el área catódica masiva del oro acelera drásticamente la disolución anódica del níquel en los defectos, causando una degradación localizada severa (Mousavi et al., 2022). El fenómeno es especialmente relevante con alta humedad y cloruros (secciones 3.2 y 3.4).

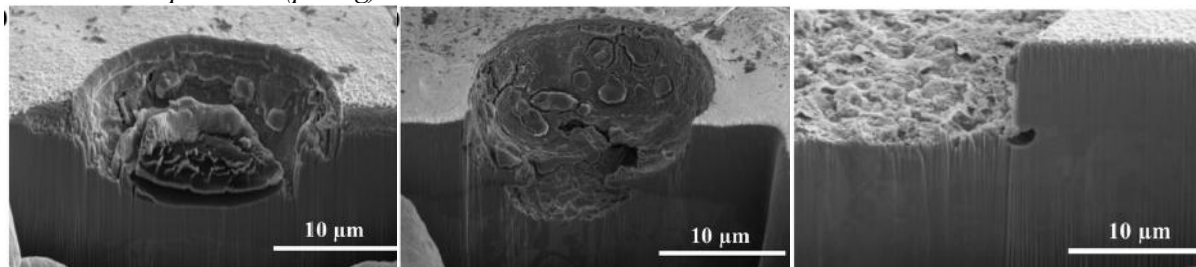
La morfología dominante es la corrosión por picaduras (Figura 8), que progresa verticalmente a través del níquel y puede extenderse bajo la capa de oro, comprometiendo su adherencia. La cinética se intensifica con los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), que penetran en las cavidades y rompen la pasividad local del níquel, efecto marcado en atmósferas marinas, donde el ENIG desarrolla productos de corrosión densos (Feng et al., 2019). Esta degradación genera fallos

por circuito abierto (pérdida de continuidad del níquel) y debilita mecánicamente las juntas de soldadura, susceptibles a fractura bajo esfuerzos mínimos (Mousavi et al., 2022); en el capítulo 7 se discuten medidas como el ENEPIG y los recubrimientos conformales.

En centros de datos con alta humedad y contaminación gaseosa, esta corrosión puede manifestarse incluso en contactos no permanentes: la acumulación de productos de níquel (hidróxidos y sales complejas) sobre el oro aumenta la resistencia de contacto y provoca errores de señal intermitentes antes del fallo total. El análisis por SEM (Figura 9) muestra terminales ENIG, tras ensayos de vida acelerados, cuyo óxido de corrosión cubre amplias zonas del contacto (Monlevade et al., 2019); el mecanismo de iniciación las imperfecciones del oro que dan acceso al níquel se detalla en la Figura 10. En conjunto, la integridad de la capa de oro es el factor determinante de la fiabilidad del ENIG.

**Figura 8.**

*Análisis de la picadura (pitting) en un acabado ENIG mediante FIB-SEM/EDS.*



**Nota:** Análisis FIB-SEM/EDS de la picadura en muestras ENIG-Cu en NaCl 3,5 % a pH 2, en sección transversal y vista superior, a potenciales anódicos crecientes: (a) tras 80 mV y (b) tras 200 mV de polarización (PDP), donde se observa el crecimiento de la cavidad bajo la superficie; (c) sección transversal del borde de la picadura tras 800 mV. Se evidencia la progresión de la picadura a través del níquel y el socavado de la capa de oro. Adaptado de Mousavi et al. (2022), "Localised aqueous corrosion of electroless nickel immersion gold-coated copper", Fig. 8, p. 527.

#### **4.4. Análisis de fallos en contactos eléctricos no permanentes.**

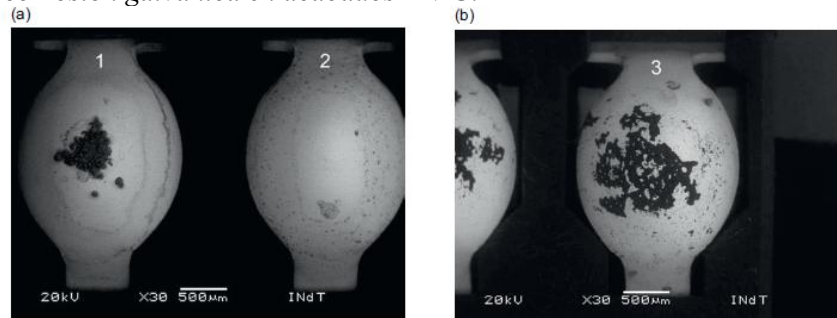
Los contactos no permanentes, conectores, sockets y terminales de presión, dependen del contacto mecánico, no de una unión metalúrgica, por lo que sus interfaces quedan expuestas a la penetración de agentes corrosivos a través de las micro-holguras de la conexión. Su principal consecuencia metalúrgica es el aumento de la resistencia de contacto ( $R_c$ ) por la

formación de películas aislantes de óxidos, sulfuros o cloruros, que degrada la señal y genera puntos calientes que realimentan la oxidación (Monlevade et al., 2019).

Un mecanismo característico de estos componentes es la corrosión por fricción (*fretting corrosion*), provocada por micro-movimientos oscilatorios derivados de las vibraciones de los ventiladores o de las expansiones térmicas cíclicas. Estos movimientos rompen continuamente las capas pasivas del estaño o el níquel y exponen metal fresco que se oxida de inmediato; la acumulación de óxido en la zona de contacto actúa como abrasivo y aislante, derivando en fallos por circuito abierto intermitente (Rathish et al., 2019). Además, en ambientes con alta concentración de  $H_2S$ , los acabados de plata sufren una sulfuración severa que forma una capa de  $Ag_2S$  semiconductor, capaz de interferir en las transmisiones de alta frecuencia antes de cualquier degradación física evidente (Saini et al., 2022).

**Figura 9.**

*Mecanismo de corrosión galvánica en acabados ENIG.*



**Nota.** Vistas superiores (SEM) de terminales de contacto no permanente con acabado ENIG sometidos a 1000 h de ensayo de vida acelerado: (a) terminales 1 y 2, el terminal 1 presenta un depósito central de productos de corrosión y el 2 un ataque incipiente; (b) terminal 3, con corrosión más extendida. El óxido de corrosión llega a cubrir amplias zonas de la superficie. Adaptado de Monlevade et al. (2019), “Galvanic corrosion of electroless nickel/immersion gold plated non-permanent electric contacts used in electronic devices”, p. 566.

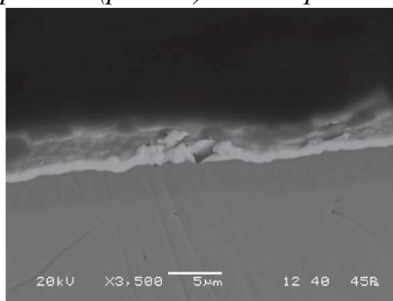
El análisis de fallos requiere caracterización morfológica y química para distinguir entre corrosión atmosférica, desgaste mecánico y defectos de fabricación. Mediante sección transversal y EDS se ha determinado que, en muchos conectores ENIG, la falla se origina en imperfecciones puntuales (poros o *pinholes*) de la capa de oro atribuidas a impurezas retenidas durante el recubrimiento, a través de las cuales el níquel queda expuesto y sus productos de corrosión migran hacia la superficie de contacto (Figura 10). Así, la fiabilidad de estos

contactos depende tanto de la calidad del recubrimiento como de la estabilidad del entorno químico; el capítulo 7 detalla medidas como el acabado ENIG y los lubricantes conductores.

Caracterizados los mecanismos en las PCB y sus componentes, el capítulo 5 aborda la metalurgia de las soldaduras libres de plomo (SAC) que unen estos componentes.

**Figura 10.**

*Sección transversal de un defecto puntual (pinhole) en la capa de oro de un terminal ENIG.*



**Nota.** Micrografía SEM en sección transversal de un terminal de contacto no permanente con acabado ENIG, donde se observa un defecto puntual (*pinhole*) en la capa de oro que deja expuesto el níquel subyacente. Este tipo de imperfección, atribuida a impurezas retenidas durante el recubrimiento, constituye la vía de inicio de la corrosión galvánica del níquel. Adaptado de Monlevade et al. (2019), "Galvanic corrosion of electroless nickel/immersion gold plated non-permanent electric contacts used in electronic devices", Fig. 5(b), p. 567.

## **5. Comportamiento Metalúrgico de las Soldaduras Libres de Plomo (*Lead-Free*)**

### **5.1. Microestructura de las aleaciones Sn–Ag–Cu (SAC) y formación de intermetálicos**

#### **(Ag<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>)**

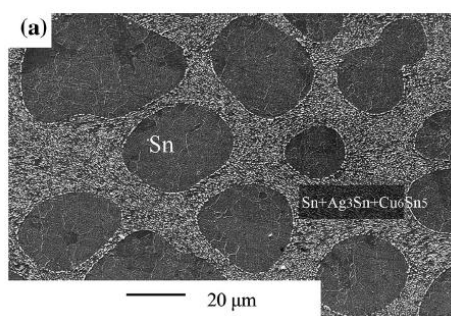
La microestructura de las aleaciones del sistema estaño-plata-cobre (SAC), como la ampliamente utilizada SAC305, es fundamental para determinar su resistencia a la degradación química. Tras el proceso de solidificación, estas soldaduras presentan una estructura constituida por una fase matriz de estaño ( $\beta$ -Sn) proeutéctico rodeada por regiones eutécticas finas. Dentro de estas áreas eutécticas se precipitan compuestos intermetálicos (IMC) de dimensiones microscópicas, principalmente partículas de Ag<sub>3</sub>Sn y Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>. La morfología y distribución de estos IMC están dictadas por la composición estequiométrica de la aleación y los parámetros de enfriamiento, factores que definen las propiedades mecánicas y, críticamente, la estabilidad electroquímica de la unión (Wang et al., 2014).

Desde el punto de vista de la corrosión, la presencia de estos intermetálicos alrededor de los bordes de grano genera una heterogeneidad electrónica que activa mecanismos de micro-

galvanismo, como se evidencia en la Figura 11. En un medio electrolítico como la capa delgada de humedad (TEL) presente en los data centers, se establece una celda galvánica local donde la matriz de estaño ( $\beta$ -Sn), al tener un potencial de reducción más negativo, actúa como ánodo, convirtiéndose en el área que sufre la oxidación. Por el contrario, los precipitados de  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  y  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , al ser termodinámicamente más nobles, funcionan como eficientes sitios catódicos donde se lleva a cabo la reducción del oxígeno disuelto en la capa de humedad. Esta diferencia de potencial impulsa la disolución continua y selectiva de la matriz de estaño que se encuentra adyacente a las partículas intermetálicas. Los iones de estaño liberados en este proceso reaccionan con los compuestos generados en el cátodo para precipitar productos de corrosión, inicialmente en forma de hidróxidos, que posteriormente tienden a deshidratarse para formar una película pasiva de óxidos de estaño más estable. Sin embargo, la presencia de contaminantes iónicos del aire exterior, particularmente los cloruros, impide que esta capa protectora se consolide, ya que rompen la pasividad formando complejos solubles que aceleran drásticamente el ataque localizado y la profundización del daño (Li et al., 2018). Investigaciones mediante técnicas de polarización han demostrado que una mayor densidad de partículas de  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  finamente distribuidas puede, paradójicamente, mejorar la resistencia a la corrosión al promover una pasivación más uniforme de la superficie, mientras que los precipitados grandes y aislados suelen actuar como iniciadores de picaduras profundas (Wang et al., 2014). Estudios electroquímicos en distintos medios, incluidas soluciones alcalinas, confirman que la composición y la distribución de los IMC condicionan la cinética de disolución de la matriz de estaño en las aleaciones SAC (Lee et al., 2014). Este comportamiento microgalvánico es análogo al observado en los acabados ENIG, donde la diferencia de potencial entre capas también acelera la disolución localizada.

**Figura 11.**

*Micrografía SEM de la aleación SAC305 y detalle de los precipitados intermetálicos.*



**Nota.** Micrografía SEM de la aleación comercial SAC305 (Sn-3,0Ag-0,5Cu) en estado de recepción: los granos primarios de  $\beta$ -Sn (regiones oscuras) aparecen rodeados por una red eutéctica fina y brillante compuesta por Sn +  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  +  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ . Adaptado de Wang et al. (2014), "Effect of microstructure and  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  intermetallic compounds on corrosion behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free solder", Fig. 1(a), p. 3.

## 5.2. Efecto del enfriamiento y la orientación de grano en la resistencia a la corrosión.

La velocidad de enfriamiento durante el ensamblaje influye directamente en el tamaño de grano y la escala de la subestructura eutéctica de la soldadura. Un enfriamiento rápido (como el de los procesos de reflow controlados) produce una microestructura refinada, con celdas de Sn pequeñas y una red densa de IMC; en cambio, un enfriamiento lento (en horno) favorece granos groseros y grandes agujas de  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ , mecánicamente frágiles y electroquímicamente agresivos. Los estudios comparativos indican que las microestructuras refinadas presentan tasas de corrosión significativamente menores, tanto en inmersión en NaCl como en alta humedad, debido a la formación de una capa de óxido de estaño más compacta y menos propensa a la ruptura localizada (Wang et al., 2014). Por ello, en la práctica se recomienda emplear perfiles de reflow que aseguren un enfriamiento rápido, estrategia que se retoma en el capítulo 7.

Además de la tasa de enfriamiento, la orientación cristalográfica de los granos de  $\beta$ -Sn es crucial para la cinética de disolución del sustrato. Como el estaño posee una estructura tetragonal de cuerpo centrado (BCT) altamente anisotrópica, la difusión de iones y la reactividad superficial varían según la cara expuesta: ciertas orientaciones facilitan una disolución más rápida del cobre hacia la soldadura durante la formación de la capa intermetálica de interfase ( $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ), y el ataque por picaduras se distribuye de forma dependiente de la orientación. Esto implica que, en juntas muy pequeñas con pocos granos, la resistencia a la corrosión puede ser impredecible, según si los granos facilitan o bloquean el acceso de los

agentes corrosivos a la interfase con el cobre (Wang et al., 2014). La naturaleza y continuidad de esa capa intermetálica modulan el comportamiento y dependen del sistema sustrato/soldadura empleada (Shen et al., 2021). Esta variabilidad microestructural debe considerarse al seleccionar aleaciones para aplicaciones de alta fiabilidad, como se discute en la sección 7.4.

### **5.3. Influencia de elementos de adición (Bi, Sb, Ag) en la estabilidad electroquímica.**

Las aleaciones SAC se modifican con elementos minoritarios como bismuto (Bi), antimonio (Sb) o plata (Ag) para mejorar la resistencia a la fatiga térmica y el mojado, pero estos alteran la termodinámica superficial. En aleaciones Sn-0,5Cu-3Bi-xAg, la adición de Bi (hasta un 3 % en peso) mejora la resistencia a la tracción, pero puede comprometer la resistencia a la corrosión si no se equilibra con el contenido de plata: el Bi tiende a segregarse en los bordes de grano y, en presencia de cloruros, facilita un ataque intergranular; en aleaciones con alto contenido de bismuto, como el Sn-58Bi, esta tendencia se asocia además con una mayor susceptibilidad a la migración electroquímica bajo contaminación por polvo (Lu et al., 2024). En cambio, la plata cercana al 1 % reduce la velocidad de corrosión, pues ayuda a estabilizar la película pasiva de óxido de estaño ( $\text{SnO}_2$ ) y limita el intercambio iónico con el medio (Jayesh & Elias, 2020).

Un caso particular son las aleaciones tipo InnoLot (Sn-3,8Ag-0,7Cu-3,0Bi-1,4Sb-0,15Ni), diseñadas para alta temperatura. En estos sistemas complejos, el antimonio forma con el estaño una solución sólida (Sn, Sb) que fortalece la matriz, pero actúa como fase anódica, mientras que el bismuto se segrega como una fase rica en Bi electroquímicamente noble (catódica); junto con los intermetálicos de plata ( $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ), estas fases establecen múltiples micro-celdas galvánicas. La polarización potencio dinámica revela que la combinación de elementos de adición puede desplazar el potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) hacia valores más nobles, pero a costa de una pasivación menos estable. Así, aunque la aleación sea "más noble"

en teoría, una vez que se rompe la capa de óxido el daño puede progresar más rápido por la complejidad de las micro-celdas, y las picaduras tienden a localizarse junto a la fase catódica de bismuto (Li et al., 2018). En el capítulo 7 (sección 7.4) se profundiza en la selección de aleaciones y acabados como estrategia de mitigación.

## 6. Corrosión en Sistemas de Enfriamiento e Infraestructura

### 6.1. Corrosión en tuberías de cobre: ataque *ant-nest* e interfase aleta-tubo.

La corrosión tipo "nido de hormigas" (*ant-nest* o corrosión formicaria) es un ataque localizado en los tubos de cobre de pared delgada de los intercambiadores de calor de sistemas HVAC y de enfriamiento de centros de datos. Se caracteriza por túneles microscópicos interconectados que avanzan a través de la pared hasta provocar fugas puntuales (*pinholes*); por ser un ataque interno, resulta casi indetectable por inspección visual hasta que se pierde el refrigerante (Cozzarini et al., 2020).

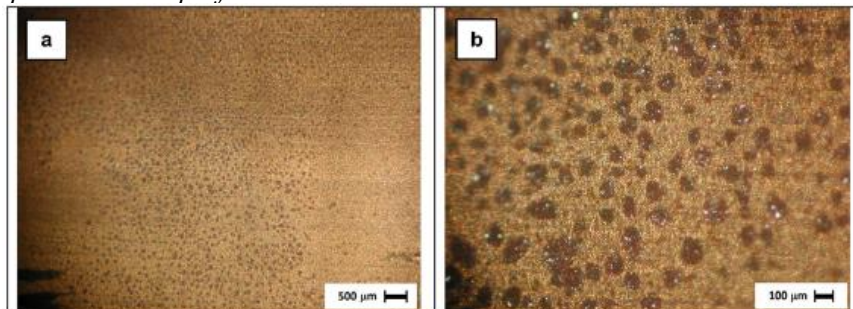
Su inicio requiere la presencia simultánea de oxígeno, humedad y, de forma crítica, trazas de ácidos orgánicos volátiles (principalmente fórmico y acético), provenientes de la degradación de lubricantes, solventes de limpieza o emisiones de materiales (compuestos orgánicos volátiles, VOC). Al condensarse la humedad sobre el cobre, los ácidos forman carboxilatos cuprosos inestables que se oxidan a óxido cuproso ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), cuya expansión genera un efecto de cuña que abre microgrietas y expone más metal, en un proceso autocatalítico que propaga los túneles hasta perforar la pared (Cozzarini et al., 2020). Morfológicamente, los túneles se ramifican de forma errática sin seguir necesariamente los límites de grano y dejan una red de cavidades rellenas de productos porosos: en la superficie interna esto se manifiesta como manchas oscuras de óxidos de cobre (Figura 12) y, por SEM, como una red de grietas ramificadas con picado tipo *pinhole* (Figura 13). El cobre desoxidado con fósforo (Cu-DHP), material estándar de estas tuberías, es especialmente susceptible si carece de recubrimientos de

protección, y el análisis de los depósitos y de esta morfología es clave para diferenciar el ataque formicario de la fatiga o la erosión (Peltola & Lindgren, 2015).

Este ataque suele localizarse en la interfase aleta-tubo de las unidades CRAC/CRAH, que combinan tubos de cobre con aletas de aluminio. Aunque la unión de ambos metales constituye en principio un par galvánico (aluminio anódico / cobre catódico), el modo de fallo documentado no es la disolución de las aletas, sino la corrosión localizada del tubo de cobre en los puntos de contacto: la interfase actúa como una trampa de humedad que retiene agua bajo las aletas tras los ciclos de condensación, manteniendo activa la oxidación del cobre aun con humedad relativa baja (Peltola & Lindgren, 2015). El efecto se agrava con el polvo entre las aletas (*fouling*), que retiene humedad y contaminantes ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , cloruros) y origina corrosión por depósito (*poultice corrosion*). La evidencia se aprecia en la Figura 14: el tubo conserva las marcas periódicas de las aletas (Figura 14A) y depósitos oscuros en los puntos de fuga (Figura 14B), donde la humedad permaneció confinada. Al progresar, los productos voluminosos provocan la pérdida de contacto mecánico aleta-tubo, reduciendo la eficiencia térmica. Por ello, en infraestructuras con enfriamiento gratuito es crítico controlar la humedad bajo las aletas; el capítulo 7 aborda el control de VOC, la filtración química para reducir cloruros, los recubrimientos internos y la selección de aletas con tratamientos de conversión.

**Figura 12.**

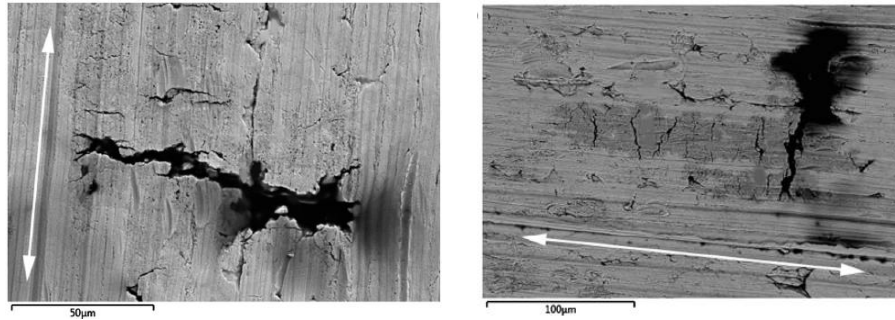
Micrografías ópticas de la superficie interna de un tubo de cobre con corrosión "ant-nest".



**Nota.** Micrografías ópticas de la superficie interna de un tubo de cobre con corrosión tipo "nido de hormigas", obtenidas con microscopio estereoscópico a (a) menor y (b) mayor aumento. Las manchas oscuras corresponden a depósitos de productos de corrosión (óxidos de cobre) que marcan en la superficie las bocas de los túneles. Tomado de Cozzarini et al. (2020), "Ant-nest corrosion failure of heat exchangers copper pipes", Fig. 3, p. 3.

**Figura 13.**

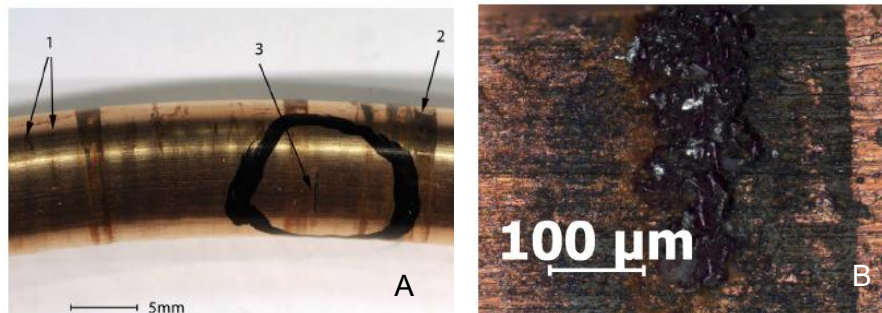
Micrografías SEM del tubo de cobre fallido con grietas ramificadas y picado pinhole.



**Nota.** Imágenes SEM del punto de fuga en la superficie externa de un tubo de cobre fallido: (a) imagen de electrones secundarios (SEI, 50  $\mu\text{m}$ ), donde se aprecia el picado tipo pinhole en la zona agrietada, y (b) imagen de electrones retrodispersados (BSE, 100  $\mu\text{m}$ ), con la oxidación superficial en gris oscuro; las flechas indican la dirección longitudinal del tubo. Se observa una grieta principal acompañada de múltiples grietas ramificadas. Tomado de Peltola & Lindgren (2015), "Failure analysis of a copper tube in a finned heat exchanger", Fig. 6, p. 88.

**Figura 14.**

Tubo de cobre de un intercambiador de calor con corrosión localizada en las huellas dejadas por las aletas de aluminio.



**Nota.** (A) Fotografía del tubo de cobre fugado tras retirar las aletas de aluminio: las marcas periódicas (1) corresponden al contacto con las aletas, la marca circular (2) indica oxidación superficial y el punto (3) señala la fuga. (B) Micrografía óptica en modo 3D de un depósito sólido negro de productos de corrosión en la zona de fuga. La humedad retenida bajo las aletas mantuvo activa la corrosión localizada del tubo de cobre. Adaptado de Peltola & Lindgren (2015), "Failure analysis of a copper tube in a finned heat exchanger", Fig. 1 (panel A, p. 85) y Fig. 4 (panel B, p. 87).

## 6.2. Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) en condensadores.

El agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) es uno de los fallos más insidiosos en condensadores y serpentines, pues progresa con escasa pérdida de material visible. Requiere la convergencia de tres factores: un material susceptible (aleaciones de cobre o latón), una tensión de tracción (residual de la fabricación o térmica de operación) y un entorno químico específico (amoníaco, nitritos o humedad con contaminantes ácidos). Las zonas de mayor riesgo son los codos de retorno y las uniones tubo-placa, donde los esfuerzos residuales son máximos (Wang et al., 2026).

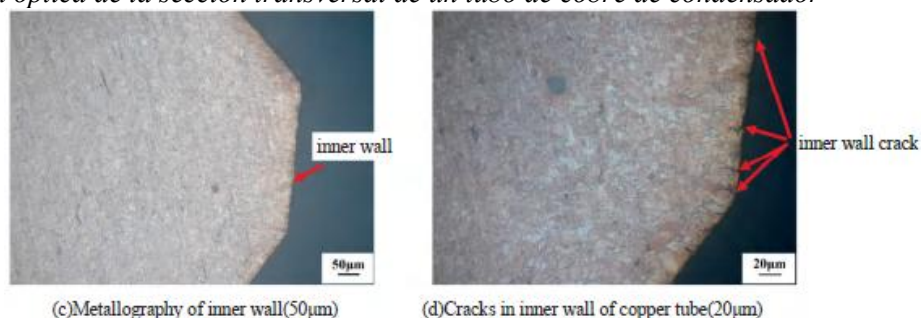
Un caso relevante para los centros de datos es el análisis de fallo de tubos de cobre TP2 (desoxidado con fósforo) de un condensador (Wang et al., 2026): se hallaron microgrietas y picaduras en la pared interna, con enriquecimiento de azufre (S) y cloro (Cl) en las zonas dañadas y una capa de depósito de carbono (36,5 % en peso) proveniente de anillos de sellado de goma deteriorados. El fallo resultó de una sinergia entre el SCC y la corrosión electroquímica acelerada por esos depósitos que actuaban como microcátodos, y el adelgazamiento de la pared culminó en una fractura dúctil por la diferencia de presión.

Morfológicamente, el SCC se presenta como grietas ramificadas, inter- o transgranulares. En los tubos analizados, las microgrietas partían de la pared interna con puntas de tendencia dendrítica (Figura 15), y el análisis EDS (Tabla 4) confirmó azufre y depósitos de carbono en los productos de corrosión, lo que evidencia la naturaleza electroquímica del ataque. La Figura 16 muestra la morfología de hoyuelos (*dimples*) de una fractura dúctil, lo que indica que el fallo final ocurrió por sobrecarga al ser insuficiente el espesor residual. Por ello es clave controlar las fuentes internas de contaminación (anillos de goma) e inspeccionar periódicamente los sistemas de enfriamiento (Wang et al., 2026).

Caracterizados los mecanismos en los componentes electrónicos (capítulos 4 y 5) y en la infraestructura de climatización, el capítulo 7 describe las estrategias de protección: monitoreo con cupones, recubrimientos conformales, filtración química y presurización, selección de acabados robustos (incluido ENEPIG) y las aleaciones de alta entropía (HEA) como frontera tecnológica.

**Figura 15.**

*Micrografía óptica de la sección transversal de un tubo de cobre de condensador*



**Nota.** Micrografías ópticas de la sección transversal cercana a la grieta de un tubo de cobre TP2 de condensador: (c) metalografía de la pared interna y (d) microgrietas que parten de la pared interna, con puntas de tendencia dendrítica. Adaptado de Wang et al. (2026), "Failure analysis of condenser copper tubes in a data center", Fig. 8 (paneles c y d), p. 6.

**Tabla 4.**

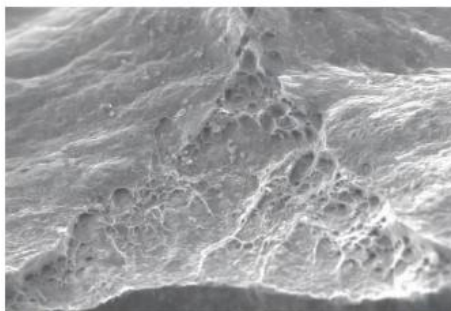
*Resultados del análisis espectral del tubo de cobre agrietado n.º 2 (%wt)*

| Elemento   | O     | Cu    | C    | Ca   | Mg   | Cl | Fe   | S   | Na   |
|------------|-------|-------|------|------|------|----|------|-----|------|
| Posición 1 | 15,49 | 57,56 | 22,1 | 0,23 | -    | -  | 3,78 | 0,7 | -    |
| Posición 2 | 11,07 | 87,22 | -    | -    | -    | -  | 0,71 | 1   | -    |
| Posición 3 | 14,64 | 37,61 | 41,1 | -    | -    | -  | 4,9  | 1,7 | -    |
| Posición 4 | 25,64 | 16,71 | 51,5 | 1,05 | 0,67 | -  | 1,01 | 0,5 | 2,35 |
| Posición 5 | 26,86 | 5,65  | 42,4 | 8,27 | 0,63 | -  | 6,12 | 0,8 | -    |

**Nota.** Resultados del análisis por espectroscopía de energía dispersiva (EDS) en cinco posiciones de la pared interna del tubo de cobre agrietado n.º 2. Predominan Cu, O y carbono (hasta ~51 % en peso, proveniente de los depósitos), con presencia de azufre (S) en todas las posiciones; el cloro (Cl) no se detectó en estos puntos, aunque sí se halló cerca de las microgrietas en un análisis posterior tras la limpieza ultrasónica. Tomado de Wang et al. (2026), Tabla 5, p. 10.

**Figura 16.**

*Micrografía SEM de la fractura tras limpieza ultrasónica.*



**Nota.** Imagen SEM de la superficie de fractura del tubo de cobre agrietado n.º 2 tras limpieza ultrasónica, con morfología de hoyuelos (dimples) característica de una fractura dúctil; indica que el fallo final se produjo por sobrecarga tras el adelgazamiento de la pared. Adaptado de Wang et al. (2026), Fig. 16, p. 14.

## 7. Estrategias para el Control y Mitigación de la Corrosión en Centros de Datos

### 7.1. Monitoreo reactivo mediante cupones de cobre y plata.

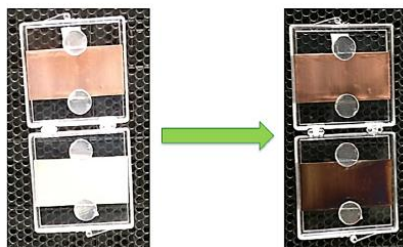
El monitoreo reactivo mediante cupones de reactividad ambiental es el método estándar (ANSI/ISA-71.04-2013) para caracterizar la agresividad química de la atmósfera en un centro de datos. A su vez, este procedimiento está respaldado metodológicamente por la norma ISO 11844-2, la cual establece las directrices estandarizadas para la determinación del ataque corrosivo en atmósferas de interiores utilizando probetas metálicas de referencia. Consiste en exponer láminas delgadas de cobre (Cu) y plata (Ag) de alta pureza (99,9 %) durante 30 días,

seguido de análisis por reducción catódica (coulométrica) o gravimetría para determinar el espesor de la película de corrosión (en angstroms, Å). Este método integra el efecto acumulativo de todos los gases contaminantes, la humedad y la temperatura (Muller, 2016). La Figura 17 muestra cómo un cupón de plata que se oscurece señala un riesgo elevado de falla por *creep corrosion*.

La necesidad de usar ambos metales radica en su selectividad química: el cobre se cubre predominantemente de óxidos y es sensible a la humedad, al  $\text{SO}_2$  y a los cloruros, mientras que la plata es un monitor crítico para los compuestos de azufre ( $\text{H}_2\text{S}$ ) en concentraciones de traza (ppb), sobre los que forma sulfuros y cloruros (Kurella et al., 2014). La clasificación G1 (ambiente seguro) exige tasas inferiores a 300 Å/mes en cobre y a 200 Å/mes en plata (ASHRAE TC 9.9, 2011). Estudios de campo en un data center con economizadores (clasificado G2) registraron tasas de corrosión de plata de 233 y 363 Å/mes, ambas por encima del límite G1, frente a 102 y 122 Å/mes en cobre, lo que evidenció que los compuestos de azufre eran el contaminante dominante (Awe et al., 2020). La limitación principal del método es su naturaleza estática (promedio mensual), incapaz de detectar picos de contaminación de corta duración; por ello se recomienda complementarlo con monitores en tiempo real (sensores de resistencia de película delgada) en instalaciones de misión crítica.

### Figura 17.

*Apariencia macroscópica de cupones de Cu y Ag tras exposición.*



**Nota.** Apariencia macroscópica de cupones de cobre (arriba) y plata (abajo) antes (izquierda) y después (derecha) de 30 días de exposición en un centro de datos con economizadores. El cupón de plata se oscurece por la formación de sulfuro de plata ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), señal de sulfuración severa y de riesgo de corrosión por fluencia. Adaptado de Awe et al. (2020), "Experimental Description of IT Equipment Reliability Exposed to a Data Center Using Airside Economizer...", Fig. 6(b), p. 4.

## **7.2. Recubrimientos conformales (*Conformal Coating*): Efectividad frente a la humedad y gases.**

Los recubrimientos conformales son películas poliméricas delgadas (de unas decenas de micrómetros de espesor) que aíslan físicamente las PCB de la humedad y los gases corrosivos, elevando la humedad relativa crítica del sistema; constituyen una de las principales tecnologías de protección de los componentes electrónicos (Zhao et al., 2023). Los materiales más comunes son acrílicos (AR), poliuretanos (UR), siliconas (SR) y parileno (XY). No obstante, su fiabilidad depende de la continuidad de la película: en presencia de discontinuidades (poros o burbujas), la corrosión por fluencia puede iniciarse en esos puntos y extenderse por debajo del recubrimiento, levantándolo (Saini et al., 2022). Un ejemplo del tipo de daño que estos recubrimientos buscan prevenir se muestra en la Figura 18.

En ensayos acelerados con flores de azufre (FOS), Singh et al. (2020) demostraron que el epoxi de dos componentes (tipo B) y un epoxi UV-curable (tipo B) ofrecieron una protección excelente frente al ataque por azufre, mientras que los recubrimientos no epoxídicos, siliconas, fluoropolímeros y termoplásticos, resultaron considerablemente menos protectores. La eficacia depende además del método de aplicación: la inmersión garantiza una cobertura total, pero complica el enmascaramiento de conectores, mientras que la aspersión selectiva es más práctica pero propensa a la formación de poros (*voids*). Por otra parte, los recubrimientos añaden una resistencia térmica de 2–5 °C, por lo que en servidores de alto rendimiento se recomienda aplicarlos selectivamente solo en las zonas de alto riesgo (resistencias de chip, terminaciones de plata) en lugar de recubrir toda la PCB (Muller, 2016).

**Figura 18.**

*Corrosión por fluencia en un pad de PCB: daño que los recubrimientos conformales buscan prevenir.*



**Nota.** Detalle de un pad de una placa de circuito impreso afectada por corrosión por fluencia (*creep corrosion*) tras exposición acelerada en cámara de flores de azufre (FOS); los productos de corrosión emergen del pad y se extienden sobre la superficie. Este es el tipo de daño que un recubrimiento conformal continuo busca evitar, y que se inicia en las discontinuidades cuando el recubrimiento es defectuoso. Adaptado de Fu et al. (2018), "Testing Printed Circuit Boards for Creep Corrosion in Flowers of Sulfur Chamber", Fig. 10(a), p. 8.

### 7.3. Filtración química y control de presurización en salas de servidores.

La filtración química (de fase gaseosa) es la barrera más robusta frente a los contaminantes moleculares aerotransportados (AMC). Utiliza lechos de carbón activado (adsorción física) o de alúmina activada impregnada con permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) (quimisorción) para neutralizar gases ácidos como el  $\text{H}_2\text{S}$  y el  $\text{SO}_2$  mediante reacciones de oxidación irreversible (Muller, 2016). La secuencia habitual consiste en un pre-filtro de partículas (MERV 8-11, que protege los poros del medio químico), el lecho químico (*deep bed*) y un post-filtro (Saini et al., 2022). Con un diseño adecuado, tiempo de residencia y espesor de lecho suficientes, la eficiencia de eliminación de gases como el  $\text{H}_2\text{S}$  puede ser muy alta, del orden del 99 % en sistemas correctamente dimensionados.

El control de presurización positiva, manteniendo la sala a una ligera sobrepresión respecto a las áreas adyacentes evita la infiltración de aire no filtrado por puertas, sellos de cables o grietas. El aire de reposición (*makeup air*) debe filtrarse químicamente antes de ingresar. La gestión del punto de ruptura (*breakthrough*) del medio filtrante se realiza mediante un análisis de vida del medio (*Media Life Analysis*, MLA), que combina la medición de la caída de presión, el muestreo periódico del medio para estimar su vida remanente y la colocación de cupones de corrosión aguas arriba y aguas abajo de los filtros para confirmar su efectividad

(Muller, 2016). En data centers con economizadores se recomienda, además, instalar sensores de resistencia de película delgada antes y después de los filtros para detectar picos de contaminación y activar el modo de recirculación total cuando sea necesario.

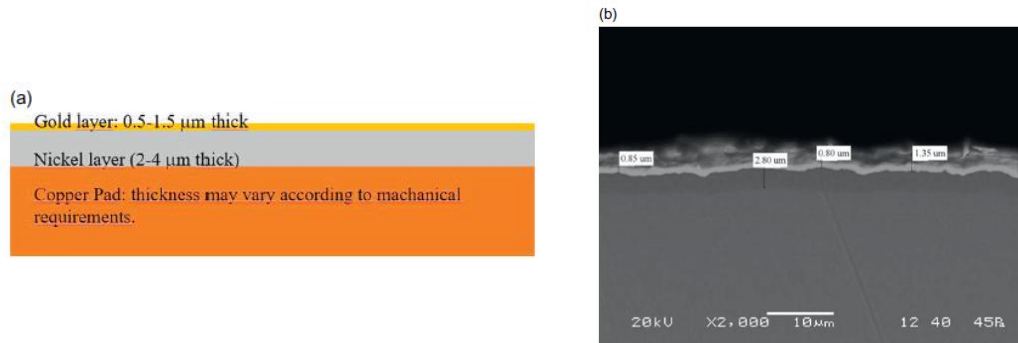
#### 7.4. Selección de materiales y diseño de acabados superficiales robustos.

La elección del acabado superficial es determinante para la fiabilidad de las PCB en ambientes con contaminación gaseosa corrosiva. Los acabados de plata por inmersión (ImAg) son los más vulnerables a la corrosión por fluencia, mientras que el ENIG (níquel químico + oro por inmersión) ofrece mayor protección, aunque puede sufrir corrosión galvánica si la capa de oro es porosa. El acabado ENEPIG (níquel químico + paladio + oro) introduce una capa intermedia de paladio que reduce la porosidad y evita el fenómeno de "*Black Pad*". La Figura 19 muestra la estructura de capas del ENIG: una fina capa de oro ( $0,5\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m}$ ) sobre una capa de níquel ( $2\text{--}4\text{ }\mu\text{m}$ ) que actúa como barrera de difusión y protege el cobre; por lo reducido del espesor del oro, cualquier discontinuidad se convierte en un punto potencial de corrosión (Monlevade et al., 2019).

En cuanto al desempeño frente a la corrosión por fluencia, Fu et al. (2015) demostraron que incluso el ENIG más resistente que el ImAg puede sufrirla, y propusieron medidas de diseño para mejorar su robustez; el ENEPIG, con su capa adicional de paladio, la eleva todavía más. El diseño físico de la PCB también influye: las vías tapadas (*via plugging*) y la máxima cobertura de la máscara de soldadura (*solder mask*) reducen las áreas de cobre expuesto. Para resistencias de chip con terminaciones de plata, se recomienda usar componentes con barrera de níquel o rediseñar las almohadillas para que la soldadura cubra por completo el metal base (Saini et al., 2022). En conectores no permanentes, los lubricantes conductores (con inhibidores de corrosión) mitigan el *fretting* y la sulfuración de los contactos de plata. En conjunto, la

selección de acabados y el diseño de la PCB constituyen tecnologías clave de protección frente a la corrosión en la electrónica de los centros de datos (Zhao et al., 2023).

**Figura 19.**  
*Acabados ENIG*



**Nota.** (a) Representación esquemática de las capas de un contacto ENIG típico (cobre/níquel/oro). (b) Sección transversal de un terminal no permanente con acabado ENIG; se indican los espesores del níquel y el oro. Tomado de Monlevade et al. (2019), "Galvanic corrosion of electroless nickel/immersion gold plated non-permanent electric contacts...", Fig. 1, p. 2.

## 7.5. Aleaciones de alta entropía (HEA) aplicadas a la electrónica.

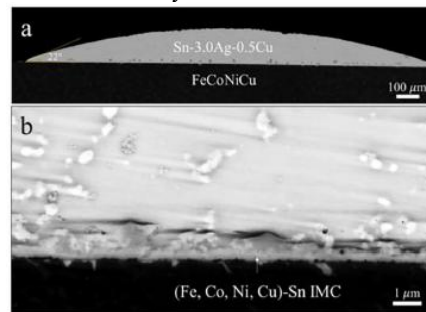
Como frontera tecnológica, las aleaciones de alta entropía (HEA) del sistema FeCoNiCu se investigan para reemplazar los sustratos de cobre tradicionales. Estas aleaciones forman capas protectoras complejas de óxidos mixtos con una estabilidad térmica y una resistencia a la corrosión superiores a las del cobre puro. La Figura 20 muestra que la capa intermetálica multi-elemento (Fe,Co,Ni,Cu)Sn<sub>2</sub> que se forma con la soldadura SAC305 tiene un espesor de solo 0,68  $\mu\text{m}$ , unas 3,7 veces más delgada que la capa de Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> que se desarrolla sobre cobre ( $\approx 2,5$   $\mu\text{m}$  en las mismas condiciones), lo que reduce el consumo del sustrato y la fragilidad mecánica de la unión (Shen et al., 2021).

En pruebas de polarización potenciodinámica en una solución de NaCl al 3,5 %, el sustrato FeCoNiCu presentó una densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) de  $5,04 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> y un potencial de corrosión ( $-0,32$  V) ligeramente más noble que el del acero inoxidable 304 ( $-0,34$  V, usado como referencia), lo que refleja una resistencia a la corrosión en cloruros del mismo orden que la de dicho acero. Además, la delgada capa intermetálica que forma con la soldadura SAC305 reduce el consumo del sustrato y la fragilidad de la unión (Shen et al.,

2021). Estas propiedades posicionan a las HEA como una alternativa prometedora para los ambientes de mayor severidad (ISA Clase G3/GX); no obstante, su coste de fabricación y la dificultad de procesamiento limitan hoy su uso a aplicaciones de muy alta fiabilidad (aeroespacial, militar), y se espera que el desarrollo de HEA basadas en elementos más abundantes permita su adopción en data centers comerciales en la próxima década.

**Figura 20.**

*Interfase de reacción entre soldadura SAC305 y un sustrato de aleación de alta entropía (HEA).*



**Nota.** (a) Imagen SEM de baja magnificación de una unión de soldadura SAC305 sobre un sustrato de aleación de alta entropía FeCoNiCu (ángulo de contacto  $\approx 22^\circ$ ) y (b) detalle, por microscopía electrónica de barrido, de la capa intermetálica multi-elemento (Fe,Co,Ni,Cu)Sn<sub>2</sub> formada en la interfase, de espesor reducido ( $\approx 0,68 \mu\text{m}$ ) que minimiza el consumo del sustrato. Adaptado de Shen et al. (2021), "Formation of (Fe,Co,Ni,Cu)Sn<sub>2</sub> intermetallic compound at the interface between Sn-3.0Ag-0.5Cu solder and FeCoNiCu high-entropy alloy", Applied Surface Science 546, Fig. 8, p. 6.

## 8. Conclusiones

Se determinó que las condiciones más favorables a la corrosión combinan una humedad relativa elevada ( $\geq 70 \%$ ), temperaturas moderadas ( $18\text{--}27^\circ\text{C}$ ) y la presencia simultánea de gases ácidos ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{Cl}_2$ ) en concentraciones del orden de partes por billón (ppb). Los economizadores de aire constituyen el principal vector de ingreso de estos contaminantes, pues exponen el hardware a fluctuaciones de humedad y temperatura que propician la formación de la capa delgada de electrolito (TEL). Asimismo, las partículas delicascentes del polvo pueden formar un electrolito concentrado al superarse su humedad de deliquesencia (DRH), activando la corrosión incluso dentro de los rangos recomendados por ASHRAE.

Los estudios experimentales y casos de falla permitieron caracterizar los mecanismos dominantes en la electrónica. La corrosión por fluencia (impulsada por  $\text{H}_2\text{S}$  y humedad  $\geq 60 \%$ ) genera sulfuro de cobre que migra sobre la máscara de soldadura, sobre todo en los

acabados ImAg; la migración electroquímica (ECM) forma dendritas metálicas o ricas en óxidos que provocan cortocircuitos; el ENIG sufre corrosión galvánica en las discontinuidades de la capa de oro (picaduras y "*Black Pad*"); y en contactos no permanentes, las películas de sulfuro de plata, agravadas por el *fretting*, elevan la resistencia de contacto. En las soldaduras SAC, los intermetálicos  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  y  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  actúan como cátodos frente a la matriz de  $\beta\text{-Sn}$ , favoreciendo la disolución selectiva del estaño, atenuable con microestructuras refinadas y  $\sim 1$  % de plata.

En la infraestructura de enfriamiento, la corrosión "nido de hormigas" del cobre requiere ácidos orgánicos volátiles; la interfase aleta-tubo actúa como trampa de humedad que acelera la corrosión localizada del tubo; y el agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) en condensadores se ve favorecido por depósitos de carbono de sellos de goma degradados que actúan como microcátodos.

Se describieron las estrategias de mitigación. El monitoreo reactivo con cupones de cobre y plata (ANSI/ISA-71.04) permite clasificar la severidad ambiental (G1 a GX) y conviene complementarlo con sensores en tiempo real que detecten picos de contaminación. Los recubrimientos conformales de epoxi, el de dos componentes y el UV-curable de tipo B, ofrecen la mejor protección frente al azufre si se aplican sin discontinuidades. La filtración química de lecho profundo (carbón activado o alúmina con  $\text{KMnO}_4$ ) y la presurización positiva de las salas reducen la entrada de gases ácidos. En materiales, el ENEPIG (Ni/Pd/Au) presenta la mayor resistencia a la corrosión por fluencia, y las aleaciones de alta entropía (FeCoNiCu) se perfilan como alternativa para ambientes de alta severidad, aunque su coste limita su uso a aplicaciones de muy alta fiabilidad.

## 9. Recomendaciones

Se recomienda mantener la humedad relativa entre 40 y 50 % y controlar el punto de rocío. En instalaciones con economizadores, instalar filtración química de lecho profundo

(carbón activado o alúmina con  $\text{KMnO}_4$ ) y sensores de película delgada en tiempo real que activen la recirculación ante picos de contaminación. En el hardware, priorizar el acabado ENEPIG sobre ImAg o ENIG y aplicar recubrimientos conformales de epoxi por inmersión en las zonas críticas. En el enfriamiento, limitar los ácidos orgánicos volátiles, reemplazar los sellos de goma degradados y proteger internamente los tubos de cobre. Finalmente, validar trimestralmente la severidad ambiental con cupones de cobre y plata (ISA 71.04).

### Referencias Bibliográficas

- ANSI/ISA-71.04-2013. (2013). *Environmental conditions for process measurement and control systems: Airborne contaminants*. International Society of Automation.
- ASHRAE TC 9.9. (2011). *Gaseous and particulate contamination limits for data centers* [Informe técnico]. ASHRAE.
- Awe, O., Shah, J. M., Agonafer, D., Singh, P., Kannan, N., & Kaler, M. (2020). Experimental description of information technology equipment reliability exposed to a data center using airside economizer operating in recommended and allowable ASHRAE envelopes in an ANSI/ISA classified G2 environment. *Journal of Electronic Packaging*, 142(2), 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4046556>
- Cozzarini, L., Marsich, L., & Schmid, C. (2020). Ant-nest corrosion failure of heat exchangers copper pipes. *Engineering Failure Analysis*, 109, 104387. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104387>
- Feng, Y., Bai, Z., Yao, Q., Zhang, D., Song, J., Dong, C., Wu, J., & Xiao, K. (2019). Corrosion behavior of printed circuit boards in tropical marine atmosphere. *International Journal of Electrochemical Science*, 14, 11300–11311. <https://doi.org/10.20964/2019.12.73>
- Fu, H., Singh, P., Campbell, L., Zhang, J., Ables, W., Lee, D., Lee, J., Li, J., Zhang, S., & Lee, S. (2014). Testing printed circuit boards for creep corrosion in flowers of sulfur chamber [Ponencia]. IPC APEX EXPO 2014, Las Vegas, NV, Estados Unidos.
- Fu, H., Lee, D., Lee, J., Tong, G., Lee, S., Singh, P., Kazi, A., Nailos, M., Ables, W., Guo, K., & Jiang, G. (2015). Creep corrosion failure analysis on ENIG printed circuit boards [Ponencia]. International Conference on Electronics Packaging (ICEP), Japón.
- Huang, H., Guo, X., Bu, F., & Huang, G. (2020). Corrosion behavior of immersion silver printed circuit board copper under a thin electrolyte layer. *Engineering Failure Analysis*, 117, 104807. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104807>

- ISO. (2020). *ISO 11844-1:2020. Corrosion of metals and alloys — Classification of low corrosivity of indoor atmospheres — Part 1: Determination and estimation of indoor corrosivity*. International Organization for Standardization.
- ISO. (2020). *ISO 11844-2:2020. Corrosion of metals and alloys — Classification of low corrosivity of indoor atmospheres — Part 2: Determination of corrosion attack in indoor atmospheres*. International Organization for Standardization.
- Jayesh, S., & Elias, J. (2020). Investigations on the corrosion properties of Sn–0.5Cu–Bi–xAg lead free solder alloys in 3.5% NaCl solution. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 22, 150–159. <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00219-7>
- Klein, L. J., Singh, P. J., Schappert, M., Griffel, M., & Hamann, H. F. (2011). Corrosion management for data centers. *2011 27th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 21–26. IEEE.
- Kurella, A., Pathangey, B., Pukale, R., Meyyappan, K., & Proctor, A. (2014). Evaluation of corrosion films on Cu and Ag reactive monitors deployed in data center server environments [Ponencia]. Intel Corporation.
- Le, D. V., Liu, Y., Wang, R., Tan, R., & Ngoh, L. H. (2022). Air free-cooled tropical data center: Design, evaluation, and learned lessons. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 7(3), 579–594. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2021.3132927>
- Lee, L. M., Nazeri, M. F. M., Haliman, H., & Mohamad, A. A. (2014). Corrosion of Sn-3.0Ag-0.5Cu thin films on Cu substrates in alkaline solution. *Soldering & Surface Mount Technology*, 26(2), 79–86. <https://doi.org/10.1108/SSMT-01-2013-0001>
- Li, F., Verdingovas, V., Dirscherl, K., Medgyes, B., & Ambat, R. (2018). Corrosion reliability of lead-free solder systems used in electronics [Ponencia]. *2018 IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac)*, Lyngby, Dinamarca.

- Lu, F., Sun, H., Yang, W., Zhou, T., Wang, Y., Ma, H., Ma, H., & Chen, J. (2024). Electrochemical migration study on Sn–58Bi lead-free solder alloy under dust contamination. *Materials*, 17(21), 5172. <https://doi.org/10.3390/ma17215172>
- Monlevade, E. F., Cardoso, I. A. P., Maciel, E. F. L., & Alonso-Falleiros, N. (2019). Galvanic corrosion of electroless nickel/immersion gold plated non-permanent electric contacts used in electronic devices - Direct evidence of triggering mechanism. *Engineering Failure Analysis*, 96, 562–569. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.12.001>
- Mousavi, M., Kosari, A., Mol, J. M. C., & Gonzalez-Garcia, Y. (2022). Localised aqueous corrosion of electroless nickel immersion gold-coated copper. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 57(6), 520–530. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2022.2096322>
- Muller, C. (2016). *RoHS: 10 years later – IT equipment corrosion issues remain* [Ponencia]. Purafil Inc., Doraville, GA, Estados Unidos.
- Peltola, H., & Lindgren, M. (2015). Failure analysis of a copper tube in a finned heat exchanger. *Engineering Failure Analysis*, 51, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.02.016>
- Rao, J. M., Lakkaraju, A. R., Li, F., Gupta, K. K., & Ambat, R. (2026). Investigation of kinetics of ECM dendrite growth during corrosion in electronics. *Corrosion Science*, 260, 113575. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.113575>
- Rathish, R. J., Prabha, S. S., Dorothy, R., Jancyrani, S., Rajendran, S., Singh, G., & Kumaran, S. S. (2019). Corrosion issues in electronic equipments – An overview. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 8(4), 799–815. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2019-8-4-2>
- Saini, S., Shah, J. M., Shahi, P., & Agonafer, D. (2022). Effects of gaseous and particulate contaminants on information technology equipment reliability - A review. *Journal of Electronic Packaging*, 144(3), 030801. <https://doi.org/10.1115/1.4051255>

- Shah, J. M., Awe, O., Gebrehiwot, B., Agonafer, D., Singh, P., Kannan, N., & Kaler, M. (2017). Qualitative study of cumulative corrosion damage of information technology equipment in a data center utilizing air-side economizer operating in recommended and expanded ASHRAE envelope. *Journal of Electronic Packaging*, 139(2), 020903. <https://doi.org/10.1115/1.4036363>
- Shah, J. M., Misrak, A., Agonafer, D., & Kaler, M. (2019). Identification and characterization of particulate contaminants found at a data center using airside economization. *Journal of Electronic Packaging*, 141(3), 031003. <https://doi.org/10.1115/1.4043481>
- Shen, Y.-A., Hsieh, H.-M., Chen, S.-H., Li, J., Chen, S.-W., & Nishikawa, H. (2021). Investigation of FeCoNiCu properties: Thermal stability, corrosion behavior, wettability with Sn-3.0Ag-0.5Cu and interlayer formation of multi-element intermetallic compound. *Applied Surface Science*, 546, 148931. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.148931>
- Singh, P., Palmer, L., & Gaynes, M. (2020). Conformal coating characterization using stacked silver thin films [Ponencia]. *SMTA Pan Pacific Microelectronics Symposium 2020*.
- Wang, M., Wang, J., & Ke, W. (2014). Effect of microstructure and Ag<sub>3</sub>Sn intermetallic compounds on corrosion behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu lead-free solder. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25, 5269–5276. <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2300-9>
- Wang, Y., Zhang, M., Dong, Z., Li, M., & Liu, L. (2026). Failure analysis of condenser copper tubes in a data center cooling system. *Engineering Failure Analysis*, 185, 110442. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.110442>
- Zhang, R., Schmidt, R., Gilbert, J., & Zhang, J. (2018). Effects of gaseous pollution and thermal conditions on the corrosion rates of copper and silver in data centre environment: A literature review [Ponencia]. *7th International Building Physics Conference (IBPC 2018)*, Syracuse University.

- Zhang, R., Zhang, J., Schmidt, R., Gilbert, J., & Guo, B. (2020). Effects of moisture content, temperature and pollutant mixture on atmospheric corrosion of copper and silver and implications for the environmental design of data centers (RP-1755). *Science and Technology for the Built Environment*, 26(4), 567–586. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1701331>
- Zhao, Q., Liu, X., Wang, H., Zhu, Y., An, Y., Yu, D., & Qi, J. (2023). Research progress in corrosion protection technology for electronic components. *Metals*, 13(9), 1508. <https://doi.org/10.3390/met13091508>
- Zhou, T., Lu, F., Shang, M., Wang, Y., & Ma, H. (2025). Study of electrochemical migration behavior of Sn1.0Ag solder. *Metals*, 15(4), 434. <https://doi.org/10.3390/met15040434>