

# **PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA**

## **Investigación del impacto del medio ambiente sobre equipos de Telecomunicaciones**

**BANCHERO, MATÍAS LU: 126069**

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

**SAEZ, JOAQUÍN LU: 113851**

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

**COSTANZO CASO, PABLO A.**

**25 de julio de 2018**



**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	4
ABSTRACT .....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Objetivo.....	7
1.2 Descripción Del Proyecto.....	7
1.3 Aporte .....	8
1.4 Verificación.....	8
2. ESTADO DEL ARTE.....	8
2.1 Historia En La Industria De La Electrónica.....	9
2.2 Marco Teórico .....	11
2.2.1 Corrosión Como Definición Y Agentes Que La Impactan. ....	11
2.2.2 Tipos De Corrosión.....	11
2.2.3 Normativa Vigente .....	16
2.2.4 Estándares Ambientales Emitidos Por Entidades Internacionales.....	19
2.2.5 Tipos De Mediciones Válidas.....	22
2.2.6 Temperatura Y Humedad En El Ambiente.....	27
2.2.7 Tipos De Contaminantes.....	28
2.2.8 PCB – Placas De Circuitos Impresos .....	28
2.2.9 Fabricación De Los PCB.....	31
2.2.10 Acabados Superficiales.....	37
2.3 Impacto Del Desempeño De Los PCB Debido a La Normativa Ambiental.....	46
3. HIPÓTESIS .....	50
3.1 Hipótesis Número 1 .....	50
3.2 Hipótesis Número 2 .....	51
3.3 Hipótesis Número 3 .....	51
3.4 Hipótesis Número 4 .....	51
4. METODOLOGÍA.....	51
4.1 Caso De Estudio “Vendor A” Y “Operador X” .....	51
4.2 Caso Testigo Sitio Tipo A.....	64
4.3 Caso De Estudio “Vendor B” Y “Operador X” .....	72



<b>4.4 Resultados Obtenidos y Su Análisis</b> .....	75
<b>4.5 Mejoras Propuestas En Los Shelters.</b> .....	89
<b>4.6 Resultados Luego De La Implementación De Mejoras</b> .....	90
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	92
<b>Bibliografía</b> .....	94

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación estudia los impactos de los factores de entorno y ambientales sobre la vida útil del equipamiento electrónico usado en telecomunicaciones. Se tratan temas tales como los procesos de fabricación de las placas de circuitos impresos, su evolución en el tiempo y como cada proceso de fabricación está vinculado con la susceptibilidad a la corrosión. Se nombran estándares internacionales que determinan la calidad del entorno en donde el equipamiento está instalado, también se detallan los métodos de mediciones ambientales avalados por normas internacionales. El fin del marco teórico de la primera etapa es poner en contexto la investigación final, que fue basada a partir de una experiencia laboral de quienes realizamos el trabajo. Dicha investigación consistió en averiguar las causas de repetidas y abundantes fallas de hardware que se sucedían, sobre un operador de telecomunicaciones, en su red de transporte óptico recientemente desplegada. Se plantearon diferentes hipótesis, se realizaron mediciones en campo utilizando el procedimiento y los instrumentos de medición nombrados en el marco teórico, y se trabajó en conjunto con diferentes entidades nacionales e internacionales expertas en la materia. Se concluyó finalmente que la abundante tasa de fallas en los equipos de telecomunicaciones estaba directamente relacionada con el entorno ambiental y al proceso de fabricación de las placas de circuitos electrónicos. Se pudo comprobar que luego de realizar modificaciones en los sitios donde el equipamiento estaba instalado, con el fin de mejorar la calidad ambiente, que la cantidad de fallas en los electros componentes se redujo considerablemente.

## **ABSTRACT**

The present research work is based on how environmental and ambient factors affect the useful life of electronic equipment used in telecommunications. Topics such as the manufacturing processes of printed circuit boards, their evolution over time and how each manufacturing process is linked to susceptibility to corrosion will be discussed. International standards that determine the quality of the environment in which the equipment is installed will be named, as well as the methods of measuring the environment endorsed by international standards. The aim of the theoretical framework of the first stage is to put in context the final research, which was based on the work experience of those who carried out the work. This investigation consisted of finding out the cause of repeated and abundant failures of hardware that were happening, on a telecommunications operator, in its recently deployed optical transport network. Different hypotheses were raised, field measurements were made using the procedure and the measurement instruments named in the theoretical framework, and it was worked in conjunction with different national and international experts in the field. It was finally concluded that the abundant failure rate in telecommunications equipment was directly related to the environmental environment and the manufacturing process of electronic circuit boards. It was possible to verify that after making modifications in the places where the equipment was installed, in order to improve the ambient quality, the number of faults in the electro components was considerably reduced.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dado el constante crecimiento en la demanda de mayor velocidad de transmisión de datos por parte de los usuarios, las redes ópticas se han convertido en el actor principal en materia de infraestructura para sistemas de comunicación en todo el mundo, siendo DWDM *Dense Wavelength Division Multiplexing* la tecnología que mejor se adapta a las necesidades del mercado.

Este tipo de tecnología DWDM se basa en la multiplicación por división de longitud de onda y permite obtener altísimas tasas de transmisión de datos por un mismo par de pelos de fibra.

Para cubrir esta demanda que el mercado solicita, la industria necesita desarrollar constantemente dispositivos con una mayor sofisticación de circuitos eléctricos y microcomponentes. Es aquí donde los parámetros y procedimientos constructivos de cada tarjeta cumplen un rol fundamental en la vida útil del equipo.

Por otro lado en el marco de la República Argentina donde existen desplegados equipos de telecomunicaciones en zonas remotas del país atravesando diferentes condiciones climatológicas, uno de los principales desafíos es mantener las condiciones del entorno óptimas asegurando el correcto funcionamiento y vida útil de cada equipo. Al final del día lo que se busca es reducir al mínimo posible los costos de operación y mantenimiento de las redes.

El puntapié inicial que motivó este trabajo de investigación y desarrollo surgió en el ambiente laboral y fue basado en experiencias mutuas. Ambos autores trabajamos desde hace años en el rubro de las telecomunicaciones, específicamente en empresas que se dedican a la venta, instalación y puesta en marcha de equipos de telecomunicaciones, comúnmente llamadas Vendors.

Joaquin Saez desarrolla tareas confeccionando ingenierías de instalación, documentos de puesta en servicio y aprovisionamiento, y soporte de post venta de equipos de transmisión por fibra óptica, específicamente usando la tecnología DWDM<sup>1</sup>. Matias Banchero desempeña tareas de project management en proyectos que involucran el mismo tipo de tecnología. Si bien ambos trabajamos en empresas diferentes, tenemos en común un cliente, el cual y para los

---

<sup>1</sup> DWDM: es el acrónimo, en inglés, de Dense Wavelength Division Multiplexing, que significa multiplexado compacto por división en longitudes de onda. DWDM es una técnica de transmisión de señales a través de fibra óptica usando la banda C (1550 nm).

efectos de este trabajo será llamado “Operador X”.

En concreto, el inicio de este proyecto final tiene como disparador la alta tasa de fallas que se presentaba en el hardware instalado sobre la red del “Operador X”. Estas fallas no discriminaban la marca del equipo de telecomunicaciones instalado, sino que por el contrario se sucedían sobre los equipos vendidos por ambas compañías.

Para dar contexto y marco a la investigación próxima a desarrollar cabe señalar que se dio en el mismo período de tiempo de despliegue. La investigación se llevó adelante por caminos independientes en ambas compañías pero teniendo en cuenta que las condiciones de entorno donde se instalaron los equipos eran muy similares. Si bien en la mayoría de los sitios no se compartía la estructura (Shelter); el diseño, tipo y características constructivas del mismo eran iguales. Cabe señalar que el “Operador X” era el encargado de disponer los sitios donde instalar el equipamiento para ambos proveedores de tecnología (Vendors).

## **1.1 OBJETIVO**

El objetivo de este trabajo es investigar los diferentes procesos de fabricación que tienen las placas electrónicas de los equipos de telecomunicaciones, específicamente los relacionados a la transmisión por fibra óptica, y su evolución a lo largo del tiempo.

A su vez se investigan diferentes normas de todo el mundo relacionadas a los estándares permitidos de humedad, temperatura y gases nocivos en un ambiente destinado a contener este tipo de equipos. También se investigará sobre los equipos de medición necesarios para diagnosticar el estado de un determinado ambiente y si está o no en condiciones de albergar el hardware antes mencionado.

Por último, y con lo aprendido en la investigación teórica previa, se realizará un estudio en campo para determinar que un mal entorno afecta directamente en la vida útil de un equipo de telecomunicaciones.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

En el presente Proyecto se abordarán los siguientes puntos:

- A. Métodos de fabricación de placas de Circuitos integrados y su relación con la susceptibilidad a los ambientes corrosivos.
- B. Tipos de corrosión.
- C. Normativa internacional vigente.

- D. Instrumentos de medición necesarios para evaluar un ambiente y su implementación.
- E. Caso de estudio donde un operador de servicios de telecomunicaciones se vio afectado negativamente dadas constantes fallas en equipamiento producidas por un ambiente hostil para el cual el hardware no estaba diseñado para resistir.
- F. Parámetros constructivos recomendados que debe tener un sitio destinado a contener equipos de telecomunicaciones.

### **1.3 APORTE**

Este trabajo podrá considerarse como una guía para entender el cómo y por qué se puede ver reducida la vida útil de un equipo electrónico de telecomunicaciones, si no se toma en cuenta el ambiente donde está destinado a operar.

### **1.4 VERIFICACIÓN**

Se demostrará mediante exposición de resultados de mediciones en campo que condiciones de entorno desfavorables (temperatura, humedad y agentes nocivos) impactan directamente sobre la vida útil y el correcto funcionamiento de los equipos de Telecomunicaciones.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

Las fallas inducidas por la corrosión en equipos electrónicos utilizados en diferentes industrias y, en particular, la industria de las Telecomunicaciones ha sido y continúa siendo un problema de abordaje intensivo por parte de proveedores de servicio, así como también por parte de los proveedores de equipamiento. Este abordaje en conjunto desde el inicio se debe a que la corrosión es un fenómeno que no solo depende de las condiciones de construcción de cada dispositivo, sino que, principalmente, del ambiente al que estos son expuestos.

El inicio del análisis de la corrosión comienza en una de las industrias más agresivas en términos de eliminación de sustancias corrosivas al medio ambiente como la es la del papel. Con el cambio de paradigma tecnológico de la década de 80 se dejó de utilizar equipamiento puramente neumático e hidráulico para el control de la línea de producción y se pasó a la utilización de sistemas de control electrónico. Dicho cambio supuso mejoras considerables en



el proceso productivo tales como un aumento en la precisión de los parámetros de monitoreo, así como también en la velocidad de procesamiento, junto al ahorro de espacio y energía para dicho monitoreo y control de la producción. En contrapartida, dichas mejoras y las inversiones millonarias que esto trajo en el mencionado período de cambio, produjeron los primeros problemas serios de corrosión generados por los gases que el propio proceso productivo emitía en el ambiente operativo.

## 2.1 HISTORIA EN LA INDUSTRIA DE LA ELECTRÓNICA

Para comenzar a tratar el tema debemos remontarnos al año 1985, año en el cual la Sociedad Internacional para la Automatización decide lanzar su primer estándar **ISA 71.04-1985<sup>2</sup>** en el cual, se presenta tanto al sector industrial como a usuarios de equipos de automatización y control, una clasificación que permite dimensionar el potencial corrosivo de un determinado ambiente. A su vez establece una clasificación de los ambientes en función de la severidad asociada a cada tipo de agente contaminante, tanto en estado gaseoso, sólido o líquido.

Dicho estándar fue constituido e impulsado por la alta tasa de fallas que presentaban los primeros equipos electrónicos debido a la corrosión y las pérdidas millonarias que esto suponía para la industria.

Como resultado de un crecimiento en la demanda de velocidades de transmisión de datos por parte de la sociedad el hardware utilizado en los equipos de telecomunicaciones necesitó como uno de sus principales componentes tarjetas de PCB (Placa de Circuito Impreso), haciendo que la utilización de metales como el plomo fueron los mayormente utilizados para la manufactura de dichos circuitos impresos. Este metal (Pb) era comúnmente utilizado como soldante en los circuitos impresos dada su alta fiabilidad, bajo costo y alta resistencia a la corrosión. El acabado superficial más utilizado en la manufactura de los PCB era el *Nivelado de Superficie por Soldadura de Aire Caliente* (HALS), este método utiliza la aleación Sn-Pb para la mayoría de sus aplicaciones.

---

<sup>2</sup> ISA nació oficialmente como Instrument Society of America (Sociedad de Instrumentos de América) el 28 de abril de 1945, en Pittsburg, Pennsylvania, EEUU. En el otoño del 2000, el consejo de delegados de la sociedad de ISA, aprobó legalmente el cambio de nombre ISA-The instrumentation, Systems and automation Society (ISA – Sociedad de instrumentación, Sistemas y automatización).

Esto fue así hasta que en el año 2002 en la Unión Europea surge una nueva directiva **2002/95/EC** en la cual se exige la eliminación o restricción de ciertas sustancias contaminantes en la fabricación de equipos eléctricos y electrónicos (RoHS). Esta normativa entra en vigor el primero de julio del 2006 dando a los fabricantes el tiempo necesario para adaptar sus procesos de fabricación. La directiva RoHS restringe el uso de seis materiales peligrosos para la construcción de equipos eléctricos y electrónicos, siendo la restricción del Plomo la más significativa, pero además se suman a la lista metales como el Mercurio, Cadmio, Cromo VI y sustancias retardantes PBB<sup>3</sup> y PBBE<sup>4</sup>.

Si bien la restricción de metales como el plomo y otras sustancias peligrosas nombradas anteriormente para la confección de artefactos eléctricos y electrónicos tiene como fin la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos y busca el menor impacto negativo al medio ambiente, recientes investigaciones han demostrado fehacientemente que la utilización de materiales libres de plomo (LF), en contraposición, genera que dichos circuitos impresos sean más costosos para su manufactura y menos inmunes a la corrosión.

Es así que hoy en día, dependiendo del análisis previo de ambiente, se puede identificar si un ambiente es apto o no para la instalación de determinado circuito impreso.

Dados los hechos mencionado anteriormente se lanzó nuevamente una cruzada para la revisión de la norma **ISA 71.04-85** ya que los cambios obligados en la fabricación de los PCB reflejaron que la misma ya era obsoleta.

En 2013 se introduce finalmente la modificación al estándar anterior, es llamado **ISA 71.04-2013**. Se capitula como una de las normas referentes en cuanto a los estándares ambientales, haciendo énfasis en los contaminantes presentes en el aire, temperatura y humedad relativa (HR), y cómo estos parámetros influyen en la tasa de corrosión de metales como el cobre y la plata, materia prima altamente utilizada en la fabricación de circuitos impresos.

---

<sup>3</sup> PBB son las siglas del grupo de compuestos químicos del bromo llamados Polibromobifenilos o Bifenilos polibromados. Los PBB son generalmente sólidos blancuzcos.

<sup>4</sup> Los polibromodifenil éteres son una clase de compuestos bromados de extenso uso como retardantes de llama en plásticos y espumas, incluidas las carcasas de plástico de equipos electrónicos.

## **2.2 MARCO TEÓRICO**

Para poner en contexto la investigación en campo desarrollada en secciones posteriores, en el presente capítulo se detallaran definiciones de los diferentes tipos de corrosión, normativas internacionales referidas a la calidad de un entorno, estándares ambientales, tipos de mediciones válidas, tipos de contaminantes, procesos de fabricación de las placas de circuitos impresos y su relación a la susceptibilidad a corroerse.

### **2.2.1 CORROSIÓN COMO DEFINICIÓN Y AGENTES QUE LA IMPACTAN.**

Se define corrosión como el desgaste paulatino de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos persista o no su forma (definición según la Real Academia Española).

Definiremos además de manera más específica la corrosión sobre equipos electrónicos como el deterioro paulatino de los circuitos integrados producto de una reacción química entre los metales componentes de los mismos con Contaminantes Moleculares Aerotransportados (AMC) y vapor de agua presentes en el entorno operativo. Esto conlleva en una disminución en la vida útil del equipamiento con respecto su durabilidad en un entorno saludable.

Cabe destacar el fenómeno del punto de rocío como mecanismo de aceleración de la corrosión en circuitos electrónicos. Cambios rápidos de temperatura o humedad en el ambiente al cual se exponen los equipos electrónicos que operen por debajo del punto de rocío facilitan la condensación de los contaminantes en los metales de los circuitos impresos. Por ejemplo, si tenemos una humedad relativa por debajo del 50 % el fenómeno de corrosión se ve acelerado a partir de la formación de pequeñas soluciones acuosas. Si el fenómeno se observa mediante microscopio podríamos notar pequeñas piletas de condensación de agua que absorben a los gases contaminantes y se asocian mediante un proceso electrolítico formando dendritas que, finalmente pueden derivar en un cortocircuito.

Si trabajamos por arriba del 80% de humedad relativa en ambiente, el daño por corrosión ocurrirá independientemente de los niveles de contaminación por la propia corrosión ocasionada por el alto nivel de acuosidad en el ambiente.

### **2.2.2 TIPOS DE CORROSIÓN**

En esta sección explicaremos las diferentes clasificaciones que la corrosión puede adoptar según las condiciones de entorno, materiales y procesos químicos que la producen. Se

hará hincapié en los tipos de corrosión específicamente relacionados con las fallas en los PCB.

El motivo por el cual se produce la corrosión se debe a que cuando se modifica o altera la estructura de los elementos de la naturaleza éstos tienden a volver a su estado original, por ejemplo, el hierro se encuentra en la naturaleza en forma de óxidos, sulfuros y carbonatos, semejantes al herrumbre. Para convertir estos elementos en hierro metálico se debe emplear energía y esta misma energía es la que se libera cuando el hierro se convierte en herrumbre debido a la corrosión. En efecto, es la energía que guarda el metal durante el proceso de refinación lo que hace posible el proceso de corrosión (Rodríguez, 2017)

### **CORROSIÓN ACTIVA**

Una de las clasificaciones que podemos adjudicar a la corrosión es si es activa o inactiva (Pasiva). La primera es la que más nos interesa y la más relacionada con el presente trabajo de investigación. La actividad destructiva que produce sobre el metal afectado es constante y el producto resultante de la corrosión (principalmente óxido del metal afectado) se desprende paulatinamente de las capas superficiales facilitando nuevamente el ataque corrosivo.

### **CORROSIÓN PASIVA**

En contrapartida a la corrosión activa, este tipo de corrosión genera una capa superficial de producto de corrosión de una densidad mayor al metal base. Este fenómeno provee de una capa sólida y estable que evita que la corrosión se expanda y protege naturalmente al material.

### **CORROSIÓN UNIFORME**

El producto de corrosión se extiende de manera homogénea sobre la superficie atacada, de esta forma resulta sencillo calcular la vida útil de los dispositivos corroídos. La penetración media es igual en todos los puntos. Este tipo de corrosión se detecta fácilmente y a simple vista, y para que ocurra requiere de ambientes muy agresivos como atmósferas marinas o fuertemente contaminadas. La corrosión por ataque uniforme se mide en pérdida de peso respecto el material original o mediante la reducción de espesor. Dentro de la forma de medida estándar puede clasificarse como miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd) así como en pulgadas por día (ipy).

### **CORROSIÓN LOCALIZADA**

A diferencia de la corrosión uniforme donde el producto de corrosión es homogéneo en toda la superficie del metal atacado, en esta clasificación la pérdida del metal ocurre en áreas discretas o localizadas. Cuando el ataque es altamente localizado es comúnmente llamada corrosión por picadura o “*Pitting*”.

## CORROSIÓN ELECTROLÍTICA

Como lo sugiere su nombre este tipo de corrosión se produce por un fenómeno químico - eléctrico conocido como electrólisis. Esta es una reacción REDOX (Oxidación - Reducción) generada por dos metales (Ánodo y Cátodo) que se encuentran sumergidos en un electrolito<sup>5</sup> y que están a diferente potencial eléctrico. Este escenario produce una corriente eléctrica a través del electrolito generando a su vez una reacción REDOX en los metales. Hay que destacar que esta diferencia de potencial en los metales es producida por una fuente externa, como se puede observar en el diagrama simplificado de la Figura 1. A su vez para que la reacción ocurra no es necesario que los metales involucrados posean diferente potencial electroquímico.

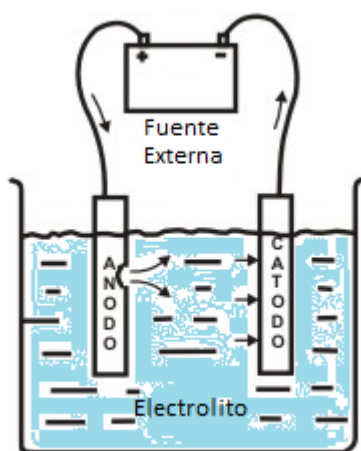


Figura 1: Corrosión electrolítica. El metal más afectado es el ánodo y es donde se produce la oxidación debido a la liberación de electrones, mientras en el cátodo se produce la reducción.

## CORROSIÓN GALVÁNICA

---

<sup>5</sup> Electrolito: Cualquier sustancia que contiene en su composición iones libres, que hacen que se comporte como un conductor eléctrico. Comúnmente, los electrolitos existen como disoluciones de ácidos, bases o sales.

Al igual que la electrolítica este tipo de corrosión se produce debido a una reacción químico – eléctrica (REDOX) entre dos metales en contacto sumergidos en un electrolito. Sin embargo la diferencia está en que no se necesita de una fuente externa para generar el flujo de corriente, sino que esta se produce meramente por la diferencia de potencial electroquímico de los metales.

Los metales más nobles como el Oro y la Plata son más estables químicamente que el Cobre o el Zinc, que por el contrario son metales menos nobles y más reactivos. Este tipo de metales (los más reactivos) tienen tendencia a liberar electrones, y por ende a oxidarse y corroerse. En el diagrama simplificado de la Figura 2 podemos ver que el metal que entrega electrones es comúnmente llamado Ánodo (Oxidación) mientras que el metal que recibe electrones es llamado Cátodo (Reducción).

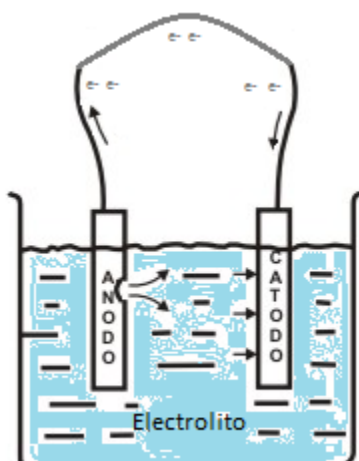


Figura 2: Corrosión galvánica. Mientras más grande es la diferencia de potencial en los metales mayor es la posibilidad de que se genere corrosión galvánica.

Hay que tener en cuenta que se va a acelerar el proceso de corrosión si la superficie sumergida del cátodo en el electrolito es considerablemente mayor a la del ánodo.

### **CORROSIÓN POR ARRASTRE (CREEP CORROSION)**

Este tipo de corrosión ocurre en montajes y dispositivos electrónicos y se produce debido a la electromigración<sup>6</sup> de los metales, no obstante no requiere de un campo eléctrico

---

<sup>6</sup> Es el transporte de material causado por el movimiento gradual de los iones en un conductor debido a la transferencia de Cantidad de movimiento entre los electrones de conducción y los átomos del metal.

externo para producirse. El elemento principal que lo causa es el Azufre, que se puede hallar en lugares cercanos a donde se hallen industrias de producción de Papel, Industrias mineras, de fabricación de caucho, de tratamiento de aguas residuales, etc.

Existe una estrecha relación entre el tipo de acabado superficial que se utiliza para la construcción de una placa de circuitos impresos con este tipo de corrosión. En la industria se pueden encontrar diferentes y variados tipos y técnicas de acabado superficial que serán explicadas posteriormente. Sin embargo en esta sección se hará hincapié en los acabados más susceptibles al ataque de este tipo de corrosión tales como el ImAg (Immersion Silver) y en menor medida el NiPd (Nickel Electroless Palladium Immersion), el ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) y el OSP (Organic Solderability Preservative).

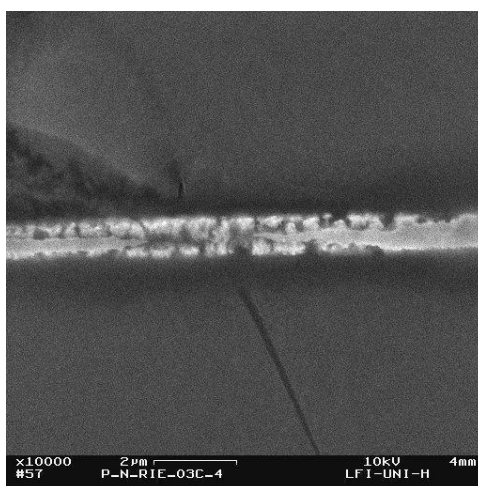


Figura 3: Falla producida electro migración en una interconexión de cobre.

El ataque de la Corrosión por Arrastre ocurre principalmente en las tarjetas de circuitos impresos que cumplen con la directiva RoHS, relacionada con la prohibición del uso de ciertas sustancias en la construcción de dispositivos electrónicos.

La utilización de metales como Plata y Cobre con Estaño para soldadura en vez del Plomo-Estaño (PbSn) utilizados antes de la directiva RoHS, tiene como contrapartida dos grandes deficiencias. Una se debe que la temperatura de fusión de la Plata es mucho más alta que la del plomo, esto causa que los epoxis<sup>7</sup> utilizados como plataforma de montaje de los circuitos impresos sean reemplazados por otros que tengan más resistencia a las altas

<sup>7</sup> Una resina epoxi o poliepóxido es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o «endurecedor». Las resinas epoxi más frecuentes para la manufactura de PCB son las FR-4.

temperaturas. La segunda es la pobre humectación de la metalización del cobre cuando se utiliza el tipo de soldadura libre de plomo.

Este tipo de corrosión es especialmente dañina en los circuitos impresos ya que se produce sobre la metalización del Cobre (y a veces la Plata) y el arrastre de este producto de corrosión, que generalmente es sulfuro de Cobre o Plata, sobre la superficie de la tarjeta puede causar cortocircuitos.

Los gases que tienen mayor influencia para el desarrollo de la Corrosión por arrastre son el Sulfuro de Hidrógeno H<sub>2</sub>S, el Dióxido de Nitrógeno NO<sub>2</sub> y el Cloro Cl<sub>2</sub> (Abbott, 1988).

### **2.2.3 NORMATIVA VIGENTE**

El dramático aumento y la rápida obsolescencia de dispositivos eléctricos y electrónicos en el Mundo actual ha llevado a la Unión Europea a desarrollar dos proyectos fundamentales en legislación ambiental que impactan profundamente en la industria electrónica, estas son la WEEE y la RoHS. Las mismas serán explicadas a continuación junto con otras normativas internacionales.

#### **DIRECTIVA RoHS**

La Unión Europea (UE) ha emitido una directiva en el año 2003 denominada RoHS, dicha sigla significa Restricción del uso de Sustancias Peligrosas (Restriction of Hazardous Substances). La misma fue implementada recién hacia el año 2003 en la UE y en el año 2006 en el resto del Mundo. El propósito de esta es restringir la utilización de sustancias peligrosas para el hombre en la fabricación de equipos eléctricos y electrónicos, si sus cantidades se encuentran por sobre los límites establecidos.

Adicionalmente la norma tiene como objeto mejorar las perspectivas de relación costo-beneficio, así como también alentar el reciclado de los desechos producidos por los materiales utilizados dentro de las industrias eléctrica y electrónica.

Dicha norma inicialmente prohíbe la utilización de 6 sustancias: Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Cromo hexavalente (Cr(VI)), Cadmio (Cd), Bifenilos polibromados (PBB), Difeniléteres polibromados (PBDE).

#### **RoHS EN CHINA**

Hacia Febrero de 2006, la República Popular China promulgó, alineada con la norma



RoHS europea, su propia norma denominada: “Management Methods for Controlling Pollution Caused by Electronic Information Products Regulation”.

Los "Métodos de gestión" chinos son similares a los requisitos RoHS de la Unión Europea porque reconocen las mismas seis sustancias peligrosas y los mismos niveles máximos de concentración. La regulación "Métodos de gestión" también define los requisitos para el etiquetado del producto y la divulgación del nivel de sustancias peligrosas.

Más allá de que el espíritu de la norma China se encuentre alineado con la norma europea, vale diferenciar que la norma China incluye dispositivos médicos automotrices, equipos de fabricación, componentes, electrónica, equipos de radar, ciertas materias primas y materiales de embalaje. Sin embargo, China RoHS no incluye electrodomésticos y juguetes dentro de sus regulaciones que si se encuentran dentro de la norma europea.

#### **ROHS EN UNIÓN EUROPEA VS. ROHS EN CHINA**

- Las dos normas fueron desarrolladas por caminos separados lo que resultó que, en muchos aspectos, la norma China sea más estricta que la europea.
- La norma China incluye equipamiento de automatización para uso médico, equipos para fabricación de equipos electrónicos, radares, procesamiento de materia prima y equipos empaquetadores.
- La norma Europea incluye regulación hogareña como lo son los casos de accesorios para el hogar y juguetes para niños que la norma China no contempla.
- La norma China responsabiliza a toda la cadena productiva en el caso de que el resultado del producto no cumpla las especificaciones, mientras que solamente importadores, fabricantes y algunos minoristas son sujeto de penalidades en el caso de que un producto no cumpla con la norma europea.
- Para el caso de importaciones, para la norma China no es suficiente que el producto cumpla con la norma Europea sino que además debe ser testeado por un laboratorio certificado dentro de China y obtener el denominado CCC. (China Certification)

#### **DIRECTIVA WEEE (WASTE ELECTRICAL AND ELECTRONIC EQUIPMENT DIRECTIVE).**

La sigla significa en español Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos..



Figura 4: Símbolo de la Directiva 2002/96/CE (RAEE/WEEE)

- La WEEE 2002/96/CE trabaja como normativa válida desde el 13 de agosto de 2005 en la EU. (Clyde F. Coombs, 2008)
- Busca trabajar sobre los diferentes materiales y componentes implementados en la industria de la electrónica para tratar de minimizar el impacto ambiental que estos producen cuando son desechados.
- A pesar de que el 10% del total del oro producido hoy en día se utiliza para la producción de equipamiento electrónico la norma se encarga de dar un marco teórico para la utilización eficiente del mismo, así como también realizar una contribución desde el punto de vista de sustentabilidad económica a partir de metodología para tratamiento de la basura electrónica cubriendo aspectos sumamente importantes como la reutilización, reciclado y ciclo de vida de los productos.
- La presente normativa está completamente alineada y es complementaria de la norma RoHS.

A continuación, una clasificación de los dispositivos electrónicos afectados por la directiva:

- Grandes electrodomésticos: Lavarropas, heladeras, aires acondicionados, microondas, etc.
- Pequeños electrodomésticos: Tostadora, reloj de pared, secador de pelo, etc.
- IT y equipos de telecomunicaciones: Computadoras, impresoras, monitores, fotocopiadoras, teléfonos, etc.
- Equipos electrónicos de consumo: DVDs, Televisores, equipos de música, etc.
- Equipo de iluminación: Lámparas, luminarias, bombillas.

- Herramientas eléctricas y electrónicas: taladros, sierras, pistolas de clavos, pulverizadores, tornos, recortadoras, caladoras, etc.
- Juguetes eléctricos.
- Dispositivos médicos.
- Instrumentos de medición y control.
- Dispensadores automáticos.

#### **2.2.4 ESTÁNDARES AMBIENTALES EMITIDOS POR ENTIDADES INTERNACIONALES.**

Se detallarán una serie de estándares que categorizan un ambiente destinado a albergar equipos electrónicos y de telecomunicaciones. Cada fabricante debe categorizar su producto para que el usuario del mismo adopte su entorno a la especificación dada.

##### **ISA 71.01 1985**

La norma presentada a la industria de la electrónica en relación a la corrosión, fue impulsada por la propia industria liderada en ese momento por las compañías desarrolladoras de sistemas de control y procesamiento de datos así como también por las principales compañías papeleras.

La misma fue llevada adelante por los laboratorios Battelle<sup>8</sup> bajo la atenta mirada de los principales actores de las industrias arriba mencionadas.

##### **ESTÁNDAR DE LA IEC: 60654-4 (1987-07)**

Este estándar permite observar el problema de las condiciones de entorno desde otra perspectiva.

La comisión electrotécnica internacional IEC, es una organización radicada en Ginebra, Suiza. Esta lidera a las organizaciones globales que preparan y publican documentos y estándares para equipos electrónicos, eléctricos y tecnología asociada. Su misión es la de normalización de normas y estándares de las industrias aquí arriba mencionadas.

---

<sup>8</sup> Empresa privada sin fines de lucro aplicada de ciencia y desarrollo tecnológico surgida en Columbus, Ohio EEUU.

En la publicación 60654-4 (1987-07) se considera el entorno industrial corrosivo y erosivo. Menciona los siguientes casos como potenciales situaciones agresivas para equipos electrónicos:

- Sistemas de medición y control de procesos industriales.
- Partes de sistemas terrestres o bien submarinos durante la operación.
- Equipos inactivos.
- Equipo en fase de almacenamiento o el transporte en cualquier fase de la cadena logística.

No se consideran las condiciones de mantenimiento y reparación pero dicho documento nos permite realizar un buen acercamiento de la corrosión desde otro punto de vista.

### **ESTÁNDAR DE JAPÓN, JEIDA-29-1990.**

Revisada y publicada en Japón como: “Electronic Industry Development Association’s (JEIDA) "Standard for Operating Conditions of Industrial Computer Control System”.

A la hora de hacer una breve reseña del abordaje que le han dado en Japón al problema de la corrosión y deterioro por agresividad propia del ambiente de los componentes eléctricos y electrónicos a partir del reconocimiento del problema, la mayor parte de los principales fabricantes mundiales de sistemas informáticos han colocado en sus manuales de planificación referencias a las normas ISA, IEC o JEIDA (Publicada en Japón hacia el año 1990) para los niveles de contaminantes en el aire porque proporcionan directrices eficaces y efectivas para proteger su electrónica y equipos eléctricos de la efectos dañinos de los gases corrosivos.

Es por esto que el hecho de citarlas nos permite ilustrar y ratificar que el abordaje del problema presentado en este proyecto final tiene relevancia e importancia en la industria en general y a nivel global.

### **ISA -71.04-2013**

Bajo el título: “Condiciones ambientales para sistemas de medición y control de procesos de Contaminantes aerotransportados” la norma cubre contaminantes aéreos e influencias biológicas que afectan al equipo de medición y control de procesos industriales, equipos de oficina electrónicos y equipos de centros de datos y redes. Ejemplos específicos de equipos de oficina electrónicos incluyen: computadoras portátiles, computadoras de escritorio, estaciones de trabajo, servidores, hardware de almacenamiento de datos, terminales, pantallas,

impresoras láser e inyección de tinta, copiadoras y máquinas de fax. Ejemplos de equipos de centro de datos incluyen: servidores, conmutadores, routers, pantallas, teclados, hardware de almacenamiento de datos, equipos de distribución de energía y equipos de climatización tales como calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC).

### **IEC 60721-3-3 V.2.2 2002**

Clasifica grupos de parámetros ambientales y su gravedad a la que se someten los productos cuando se montan para uso estacionario en lugares protegidos del clima. Esta versión consolidada consta de la segunda edición (1994), su enmienda 1 (1995) y su enmienda 2 (1996).

### **ETSI EN 300 019-1-3 V2.4.1 (2014-04)**

Esta Norma Europea (EN) ha sido elaborada por el Comité Técnico de Ingeniería Ambiental (EE) del ETSI. Dicha norma define las clases de condiciones ambientales y sus severidades a las cuales la electrónica del equipo de telecomunicaciones puede estar expuesto. Las severidades especificadas son aquellas que tendrán una baja probabilidad de ser excedidas, generalmente menos del 1%.

Dicha norma solo se aplica a los equipos montados para uso estacionario, incluidos los períodos de trabajo de montaje, tiempo de inactividad, mantenimiento y reparación en ubicaciones protegidas del clima (o sea, dentro de una sala de operaciones).

Además la norma distingue los siguientes tipos de entornos: 1. Sitios con temperatura controlada; 2. Sitios con temperatura parcialmente controlada; 3. Sitios sin control de temperatura; 4. Sitios sin control ni de temperatura ni humedad (a los cuales tipifica como “*Heat trap*”); 5. Shelters. Esta tipología aplica a un refugio donde las condiciones de radiación solar directa y el control de humedad y temperatura no existen. 6. Ambientes para equipos de telecomunicaciones. Sitios con temperatura controlada, estable con la característica de que no posee intercambio de calor con el entorno.

Esta norma es sumamente completa en términos de entornos tanto a nivel de temperatura y humedad así como también para identificar a nivel de detalle diferentes variables como: Flora y fauna presentes en el entorno, sustancias químicas presentes en el ambiente, marco para sitios con riesgo de sufrir terremotos (con la respuesta en frecuencia de los equipos frente a esta posibilidad según intensidad del mismo) o bien acción de sustancias mecánicamente activas como polvo o arena.

## **2.2.5 TIPOS DE MEDICIONES VÁLIDAS**

### **CUPONES DE PLATA Y COBRE**

Los contaminantes del aire ricos en óxidos, cloruros y sulfuros pueden causar corrosión severa de varias aleaciones materiales en muchos componentes industriales. Los costes de sustitución de los materiales de aleación y componentes (como placas de PC de muchos instrumentos industriales) pueden ser extremadamente altos. Para esto, y específicamente dentro del mundo de las telecomunicaciones existen modernas técnicas para el control de los niveles de severidad de los contaminantes atmosféricos para casos excepcionales o de laboratorio.

En cambio, para poder ser más amplios y abarcar problemas generales o acotar el margen de investigación inicial en campo se ha desarrollado el método de medición de interiores y exteriores determinada por la exposición, ensayo y análisis de la corrosividad del cobre puro (Cu) y de la plata (Ag), cuando los períodos de exposición máximos se limiten a treinta (30) días para ambientes interiores y noventa (90) días para ambientes al aire libre. La denominada CCM (Coupon Corrosivity Monitoring) ha demostrado ser una prueba eficaz, rápida y de bajo costo para microambientes industriales específicos, diferentes zonas de las ciudades, salas de control de plantas industriales, hangares de instalaciones militares, sitios industriales conocidos por generar continuamente contaminantes del aire o sitios con sala de datos para equipos de comunicaciones.

Los cupones de pérdida de metal implican la introducción de una muestra pesada de la aleación de interés en el fluido del proceso, y dejando la muestra expuesta en el entorno a estudiar durante un período de tiempo conocido (generalmente 20-90 días). La muestra se retira del sistema, se limpia de cualquier producto de corrosión residual y se vuelve a pesar. La pérdida de peso medida, junto con el conocimiento de la geometría general de la muestra, permite determinar la pérdida de espesor total durante un período de tiempo conocido, y de esto se determina la tasa de corrosión promedio.

El método es simple, sencillo y relativamente económico. Además, en comparación con los métodos de inspección tradicionales, produce datos relativamente rápido y funcionará en casi cualquier conjunto de condiciones de proceso. En consecuencia, es el método de monitorización de la corrosión más utilizado en la actualidad.

Los rangos de corrosión presentados en el Estándar antes mencionado se calculan como

la suma de películas individuales de corrosión de los diferentes compuestos y gases que pudieran estar presentes en el ambiente como clorhídricos, sulfúricos o cualquier otro tipo de película.

Cada cupón puede ser examinado calculando separadamente la contribución de cada uno de los agentes corrosivos (películas de agentes corrosivos antes mencionados). La suma de esas contribuciones da el resultado final de contaminación.

## **REDUCCION ELECTROLITICA**

El método utilizado para la medición de la velocidad de corrosión es la reducción electrolítica/catódica. Cada uno de las películas es individualmente separada una de la otra para determinar el propio potencial electroquímico que esta presenta. El potencial corrosivo será determinado por varios de los productos con los que luego se forma la plata y el cobre.

La metodología de medición apareció hacia el año 1990 en conjunto con la revisión del estándar ISA 71.04, luego de haberse realizado la investigación correspondiente.

Inicialmente las mediciones solo examinaban la cantidad total de corrosión formada sobre los cupones la cual era consistente con los valores de monitoreo citados en el estándar.

Se observa también que más allá de realizar las pruebas en ambiente de laboratorio, la complejidad en la interacción de los gases producía películas desconocidas.

Otro detalle importante que se ha determinado en la revisión del año 1990 de la norma es que, individualmente, ni el cobre ni la plata pueden por sí solos determinar el nivel o velocidad de corrosión de manera acertada debido a que, independientemente, cada uno de los cupones detecta diferentes agentes corrosivos en el entorno. Por lo cual se determinó avanzar en el sentido de realizar mediciones de ambiente con ambos tipos de cupones para tener resultados que permitan un análisis completo en términos de velocidad de corrosión.

Si se utiliza solo el cobre para monitorear la presencia de sustancias corrosivas en el ambiente no podremos determinar, por ejemplo, si en el ambiente bajo estudio hay o no contaminantes del tipo Cl<sub>2</sub> o SO<sub>2</sub> de manera concluyente. En el caso de que reportemos los resultados de mediciones con cupones de cobre únicamente, más allá de que podamos metodológicamente aislar cada una de las capas/films, no nos será posible realizar una análisis concluyente del ambiente en cuestión ya que, como marcamos aquí mismo, el ejemplo más obvio es la no detección de la presencia de Cl<sub>2</sub> el cual es altamente corrosivo para circuitos electrónicos. En cambio, para el caso del Cl<sub>2</sub>, si agregamos a la medición un cupón de plata en

el ambiente, obtendremos como resultado visible presencia de una película de  $\text{Cl}_2$  ( $\text{AgCl}$ ). (Muller, 1991)

Otro caso de agente contaminante es el del azufre (S). La formación de sulfato de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) está dominada por el  $\text{H}_2\text{S}$ . Este tipo de película fue observada solamente cuando el  $\text{H}_2\text{S}$  estaba presente en el ambiente de pruebas. El  $\text{SO}_2$  solamente produce por sí mismo una película de óxido de cobre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

Por otra parte, la ausencia de  $\text{Cu}_2\text{S}$  no indica que el ambiente esté libre de azufre si las mediciones se realizan con solo cupones de cobre. En cambio, si se agrega el cupón de plata ya que si obtenemos  $\text{Cu}_2\text{O}$  sin presencia de  $\text{Ag}_2\text{S}$  en el ambiente podemos confirmar la ausencia de azufre en el ambiente.

Otro aspecto a destacar de los efectos de los agentes corrosivos sobre los cupones: Una película de cobre puede ser producida por solo un agente contaminante; el  $\text{SO}_2$ . Esta fue una película de óxido en oposición a una película de sulfuro. Sin embargo, sobre la plata, cada contaminante por separado produce una película y nos permite diferenciar cada uno de los agentes.

## **MONITOREO DE VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN TIEMPO REAL**

Los problemas que genera medir con cupones, los cuales son expuestos al ambiente durante un período prolongado de tiempo (entre 7 y 15 días dependiendo el tipo de medición que se desee realizar, llegando a 3 o 6 meses en caso de que se requiera un análisis variables o sucesos con baja frecuencia de aparición en los ambientes) nos lleva a buscar ensayar metodología de medición en tiempo real que nos permite no solo determinar de inmediato el efecto del ambiente sobre la electrónica sino también resultados inmediatos del caso de estudio.

Para que esto sea posible se han desarrollado equipos de monitoreo en tiempo real mediante la utilización de una micro balanza piezoeléctrica de cristal de cuarzo (QCM) como sensor. Dicha micro balanza (QCM) se encuentra enchapada en cobre, plata o cualquier otro tipo de material reactivo que permita la medición del agente contaminante que se quiera medir. Además de ello se le incorpora un oscilador al QCM para que la frecuencia a la cual el cristal vibra permita ser medida y así calcular la velocidad de corrosión ya que a medida que la película de corrosión se comienza a formar, la frecuencia de resonancia del cristal cambia. Estos cambios se correlacionan con la cantidad de corrosión que se acumulará en el tiempo. Uno de los equipos que hoy día se utiliza es el *On guard 4000* que permite mediciones de velocidad de



corrosión en tiempo real con cobre y plata, del cual hablaremos y marcaremos sus principales detalles más adelante.

Estos equipos ya han sido probados en campo y los resultados que arrojan en comparación con las mediciones tradicionales con cupones de plata y cobre presentan una altísima correlación por lo que se aceptan hoy día como mecanismo válido de medición.

Cabe destacar que el método en sí de medición por cálculo de diferencia de peso es el mismo que se aplica tanto para el ejemplo de medición con cupones pasivos en el entorno como para el caso de medición en tiempo real.

### **MÉTODO ALTERNATIVO DE MEDICIÓN. CIB - CORROSION - INDICATING BRIDGE**

Un tercer método de medición para mencionar es el CIB (*Corrosion Indicating Bridge*) el cual se realiza mediante la medición de la ganancia de peso causada por la generación de cada una de las capas de metal o agente corrosivo. Este efecto antes descrito genera un aumento en la resistencia del metal con la cual se puede establecer de manera indirecta un correlato entre el aumento de dicha resistencia y la velocidad de corrosión del ambiente.

Dicho método de medición también es tratado y mencionado dentro de la norma ISA<sup>9</sup> y podemos encontrar trabajos de investigación que postulan sobre las bondades y problemas que representa realizar mediciones de campo bajo la mencionada metodología.

Esta metodología de medición no es tan utilizada ya que se ve limitada por la sensibilidad de los instrumentos de medición. Además, en la práctica, cualquier tipo de cambio por menor que sea en la temperatura producirá cambios en la resistencia lo cual incrementa el factor de error a la hora de calcular la velocidad de corrosión.

### **CARACTERIZACIÓN DE LOS AMBIENTES SEGÚN NIVEL CORROSIVO**

Como primera caracterización general de corrosión en ambientes se han diferenciado cuatro niveles de severidad.

El primero y de afectación leve es el denominado G1. Dicho nivel de corrosión en un ambiente no lo presentan como peligroso para la integridad del equipamiento y la corrosión no impacta sobre la vida útil del hardware y su correcto funcionamiento.

Más allá de eso encontramos los ambientes G2, G3 y GX (El de mayor severidad) los

---

<sup>9</sup> ISA Standard 71.04: Changes Required for Protection of Today's Process Control Equipment

cuales necesitan análisis particular en cada caso según normas ISA <sup>(9)</sup>.

Tabla 1: Niveles de severidad según exposición del cobre.

Severity Level	G1	G2	G3	GX
Copper Reactivity Level (in angstroms, Å)*	Mild < 300	Moderate < 1000	Harsh < 2000	Severe 2000

## CONTROL DE CALIDAD DE AIRE

Como primera observación de campo a la hora de revisar la calidad del aire al cual se someten los equipos electrónicos presentes en la sala a evaluar, se pueden colocar medidores o bien analizar los filtros de aire que posee la sala. Con esta medición u observación propuesta se puede determinar en un lapso de tiempo relativamente corto (días para el caso del medidor de calidad de aire y semanas para el caso de los filtros de aire) para poder dictaminar si la electrónica que se encuentra en el sitio podrá cumplir con el ciclo de vida comprometido por el fabricante.

Además del estado del aire (“suciedad” del aire o dust pollution como hemos leído en la diferente bibliografía referida al tema) hay equipamiento específico, disponible en el mercado, para medir la velocidad de corrosión en función del tipo de ambiente al cual se exponen equipos electrónicos como el mencionado anteriormente, OnGuard 4000.

Con respecto a los diferentes agentes que pueden considerarse contaminantes, debemos mencionar que, los instrumentos de medición que el mercado ofrece permiten, en líneas generales, identificar presencia activa de azufre, óxidos de azufre y compuestos orgánicos que presenten presencia activa de cloro.

Otro punto importante que debe tenerse en cuenta para poder catalogar el ambiente donde los equipos se encuentran es el impacto que tiene el entorno con el cual el Sitio/Nodo intercambia y la categorización de la zona donde se encuentra el mismo. Para determinar la categoría o tipo de entorno se utiliza información disponible de investigaciones de organismos como la OMS que categorización y miden constantemente ambientes en todas partes del mundo. Dicha información o índices elaborados dependen, por ejemplo, de la actividad industrial o contaminación fluvial o bien el nivel de contaminación debido a factores como la fumigación

en zonas agropecuarias. (WHO, s.f.)

## **CONCLUSIÓN SOBRE CALIDAD DEL AIRE - INTERIOR EXTERIOR**

Para poder mitigar, corregir o disminuir la velocidad de corrosión a parámetros dentro de la norma es clave poder tener un control sobre el estado del entorno donde los equipos se encuentran instalados.

Para esto es clave entender si existe y que nivel de interacción tiene la sala/sitio donde se encuentra el equipo con el medioambiente. Este punto lo desarrollaremos en detalle con ejemplos y casos concretos de investigación en el desarrollo del presente documento.

### **2.2.6 TEMPERATURA Y HUMEDAD EN EL AMBIENTE**

Los efectos de la temperatura y la humedad en el ambiente son también cuantificados por los mencionados estándares ya que, junto con las sustancias corrosivas, son un factor sumamente importante para definir el impacto en la funcionalidad de los equipos electrónicos.

Particularmente, para casos donde la temperatura es alta o la humedad relativa tiene variaciones altas (alto gradiente en períodos cortos) el efecto de la corrosión se observa sensiblemente acelerado por los agentes contaminantes en el ambiente.

En términos generales los estándares mencionan humedad relativa por debajo del 50% y estable para ambientes ideales con una temperatura entre los 17 °C y los 24 °C.

## 2.2.7 TIPOS DE CONTAMINANTES

Tabla 2: Contaminantes comunes y su fuente de origen

Categoría	Símbolo	Nombre Químico	Fuentes comunes de emisión
Gas	H <sub>2</sub> S	Sulfuro de Hidrogeno	Emisiones geotérmicas, actividades microbiológicas, procesamiento de combustible fósil, procesamiento de pulpa de papel, manufactura de ácido sulfúrico, plantas de tratamiento cloacal.
Gas	SO <sub>2</sub>	Dióxido de Azufre	Combustión de combustible fósil, emisión de automóviles, manufactura de ácido sulfúrico.
Gas	S <sub>8</sub> , R-SH	Mercaptanos	Fundiciones, manufactura de azufre.
		Fluoruro de hidrogeno	Manufacturación de fertilizantes, manufacturación de aluminio, manufacturación de cerámicas manufacturación e dispositivos electrónicos.
Gas	NO <sub>x</sub>	Oxido de Nitrógeno	Emisiones de automóviles, combustión de combustibles fósiles, microbios, industria química
Gas	NH <sub>3</sub>	Amoniaco	Microbios, planta de desechos cloacales, manufacturación de fertilizante, equipamiento de refrigeración, productos de limpieza.
Gas	Cl <sub>2</sub> , ClO <sub>2</sub>	Cloro, dióxido de cloro	Fabricación de cloro, fabricación de aluminio, fábricas de papel, basura en descomposición, productos de limpieza.
Gas	HCl	Cloruro de hidrogeno	Emisiones de automóviles, combustión, procesos oceánicos, combustión de polímeros.
Gas	Cl	Iones de cloruro	Contenido de aerosol, procesos oceánicos, procesamiento de mineral.
Sólida		Polvo inorgánico.	Procesamiento de roca cristalina, roca y mineral, combustión, soplado de arena y muchas fuentes industriales
Sólido	C	Carbón.	Combustión incompleta (componente de aerosol), fundición.

## 2.2.8 PCB – PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Todos los componentes electrónicos deben estar interconectados y ensamblados para formar un sistema funcional y operativo. El diseño y la manufactura de estas interconexiones han evolucionado en una disciplina separada llamada ensamblado electrónico (electronic packaging). Desde la década de 1950 la estructura por construcción en bloques básica del electronic packaging es la placa de circuitos impresos PCB (Printed Board Circuit).

Un PCB está formado por una placa principal compuesta por un sustrato aislante por lo general epoxi de vidrio que es utilizado como base para grabar caminos conductores de cobre que comunican físicamente diferentes componentes electrónicos que el sistema requiera: resistencias, capacitores, microcontroladores, inductores, potenciómetros, etc.

Cabe destacar que un PCB cargado o ensamblado con componentes electrónicos tiene la denominación de PCA (*Printed Circuit Assembly*).

Desde sus comienzos a la fecha la sofisticación de los PCB ha evolucionado de manera

sustancial. Cada vez fue más el nivel de integración de componentes requeridos sobre un mismo sistema y por ende la reducción de estos (dimensiones típicas en *mils* definida como la milésima parte de una pulgada) junto con un aumento en la densidad de conexiones supuso un reto continuo en la industria y una evolución en los métodos constructivos que más adelante describiremos.

### **DENSIDAD DE INTERCONEXIÓN DE COMPONENTES**

Para proporcionar una clasificación y tomar noción de la complejidad de un PCB, la industria ha decidido dividir su sofisticación según 3 elementos, estos son: *cantidad de componentes*, *tecnología de superficie de montaje* y *densidad de cableado*. Estos 3 elementos están relacionados y el cambio en uno de estos impacta significativamente en la densidad de interconexión global. Para visualizar la relación de estos elementos y cómo sirven para clasificar la diferente sofisticación de los PCB podemos observar la Figura 5 que nos muestra en el eje de las abscisas complejidad de los componentes y en el eje de las ordenadas la densidad de componentes por pulgada al cuadrado. A medida que estas 2 variables aumentan la tecnología de PCB también lo hace.

ELECTRONIC PACKAGING AND HIGH-DENSITY INTERCONNECTIVITY

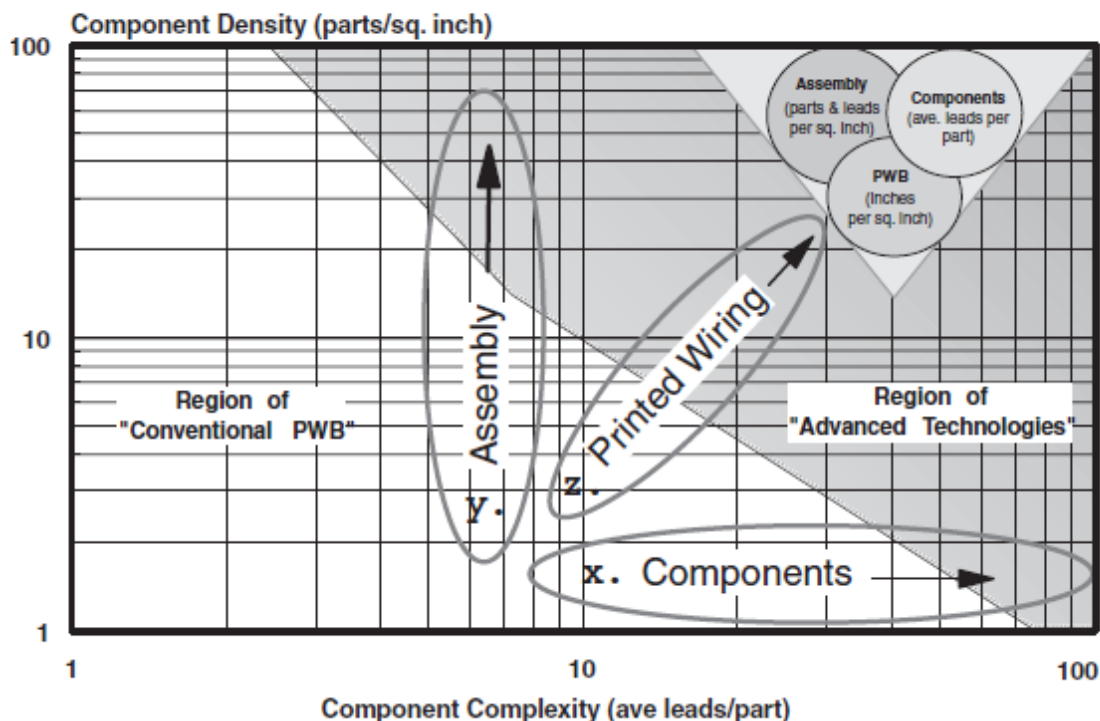


Figura 5: Evolución en la complejidad de un PCB (Clyde F. Coombs, 2008)

Evolución en la integración de un PCB desde el primer procesador RISC<sup>10</sup> en 1986 (a) con un tamaño de 8''x16'' (128 pulgadas al cuadrado) compuesto con 14 capas interconectadas a través de PTH<sup>11</sup>, pasando por una etapa media producida en el año 1991 (b) donde ya se observa la reducción considerable de tamaño para un mismo procesador RISC en este caso 16 pulgadas al cuadrado y 10 capas. La Figura 6 (b) nos muestra como en el año 1995 el mismo procesador RISC fue reducido a un PCB de tan solo 4 pulgadas cuadradas.

<sup>10</sup> En arquitectura computacional, RISC (del inglés Reduced Instruction Set Computer, en español Computador con Conjunto de Instrucciones Reducidas) es un tipo de diseño de CPU generalmente utilizado en microprocesadores o microcontroladores.

<sup>11</sup> Agujeros recubiertos con cobre que interconectan pads de diferentes capas.

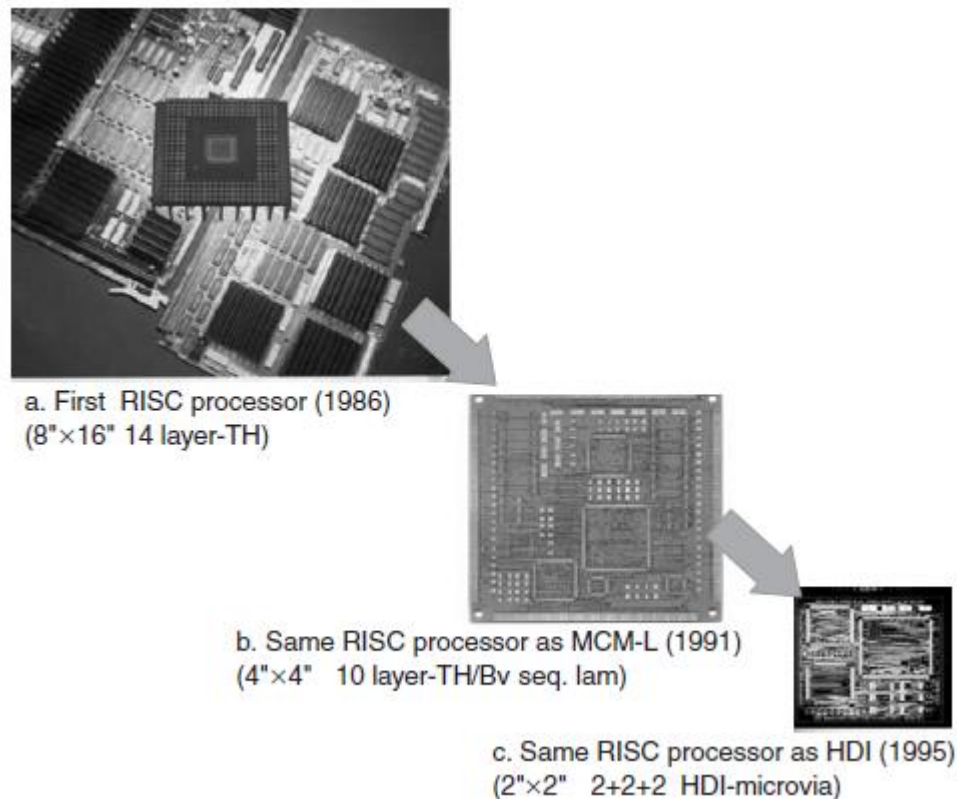


Figura 6: Evolución en la integración de un PCB (Clyde F. Coombs, 2008)

### 2.2.9 FABRICACIÓN DE LOS PCB

Para tener una noción de cómo la corrosión impacta negativamente en la vida útil de las placas de circuitos impresos hay que primero tener el mínimo conocimiento de cómo es el proceso de fabricación de las mismas y como los diferentes procesos que hoy en día dispone la industria varían en costos y dificultad, así como también cómo estos fueron evolucionando a lo largo del tiempo.

Se requieren varios procesos antes de obtener una placa de circuitos impresos terminada, nombraremos los mismos y se procederá a explicar brevemente en qué consiste cada uno.

Como se dijo anteriormente, un PCB consiste de dos partes básicas, un sustrato (la placa) y el cableado impreso (las trazas de cobre). El sustrato provee la estructura que físicamente contiene los componentes del circuito y el cableado impreso donde corresponda, y a su vez sirve de aislante eléctrico entre las partes conductoras. Un tipo común de sustrato es el FR4 que es un laminado a base de fibra de vidrio y epoxi resistente a las llamas.

Dependiendo de la complejidad del sistema, muchas veces una sola placa no es

suficiente, entonces varias capas de láminas impresas son superpuestas siendo estas vinculadas entre sí mediante agujeros conductores comúnmente llamados PTH (*Plated-Through-Hole*).

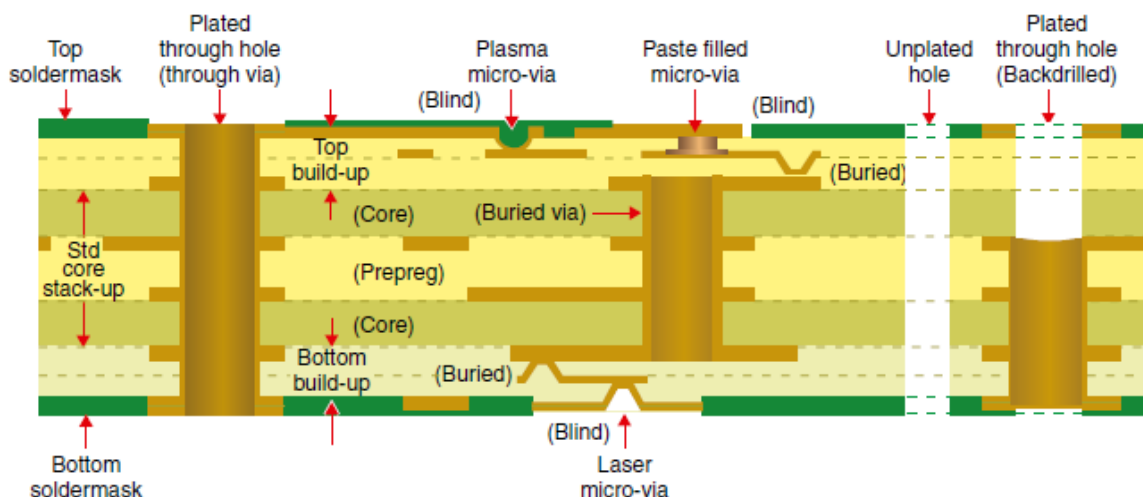


Figura 7: PCB de varias capas donde se observan diferentes vinculaciones eléctricas entre las distintas láminas y a través de los PTH. (Mitzner, 2009)

## DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO

Primero que nada se diseña el circuito según especificaciones, luego las diferentes capas que lo componen son impresas en una película mediante un foto plotter laser.

## IMPRESIÓN DEL CIRCUITO EN SUSTRATO ENCHAPADO

Como se observa en la Figura 8 el sustrato en un comienzo se encuentra recubierto por una capa delgada de cobre, de aproximadamente 1,2-1,4 *mils*<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> El mil es la mínima unidad de longitud en el sistema inglés de medidas, es la milésima parte de una pulgada. 0,0254mm.



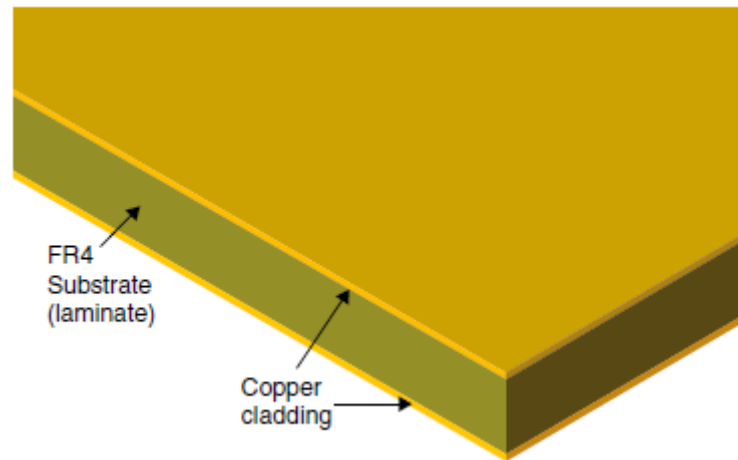


Figura 8: Sustrato recubierto por una capa delgada de cobre (Mitzner, 2009)

Lo que se realiza en este proceso es la remoción del cobre no deseado, dejando solamente el metal correspondiente al circuito diseñado. En la actualidad existen dos formas de realizar este proceso que desarrollaremos de aquí en adelante.

El *grabado mediante ácido* es un proceso de remoción selectiva de metal que requiere de un polímero para proteger del ácido al cobre útil del futuro circuito. Este polímero foto resistente se deposita sobre la superficie del sustrato enchapado, como se observa en la Figura 9.

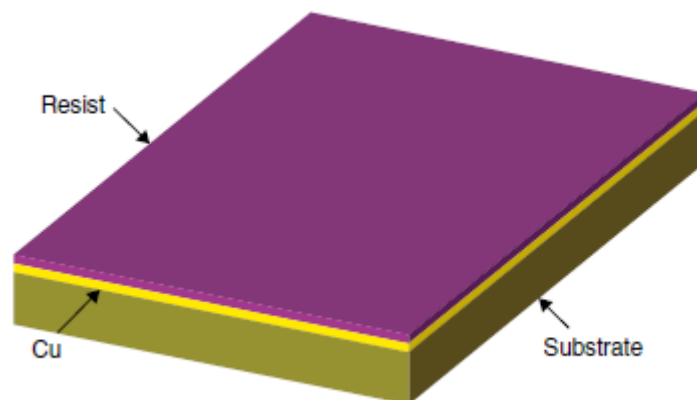


Figura 9: Grabado mediante ácido (Mitzner, 2009)

La fotorresistencia se graba con la forma del circuito impresos deseado, esto se realiza a través de un proceso llamado fotolitografía, en el cual se imprime el dibujo del foto plotter

sobre el polímero foto resistente utilizando luz ultravioleta, luego se lava utilizando un químico revelador. El químico comúnmente usado en este procedimiento es el hidróxido de sodio (NaOH).

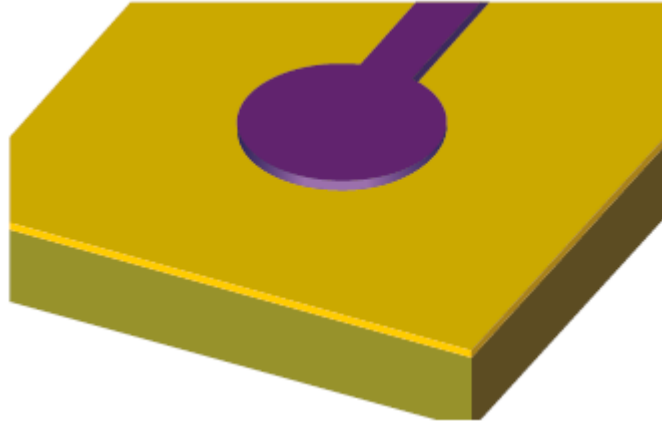


Figura 10: Fotolitografía (Mitzner, 2009)

A continuación la placa es cubierta con una solución altamente corrosiva, que puede ser amoníaco alcalino o cloruro cúprico. El material fotoresistente que se puede observar en la Figura 11 es inmune a esta solución, sin embargo todo el cobre no protegido es atacado y removido del sustrato.

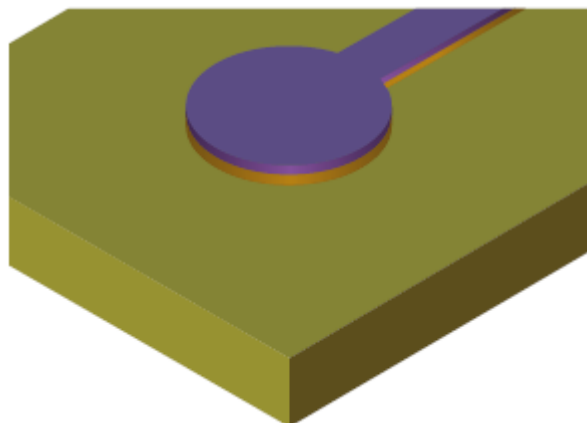


Figura 11: fotorresistencia (Mitzner, 2009)

Lo siguiente es removerá fotorresistencia del circuito de cobre ya formado, dando por finalizado todo el proceso de grabado.

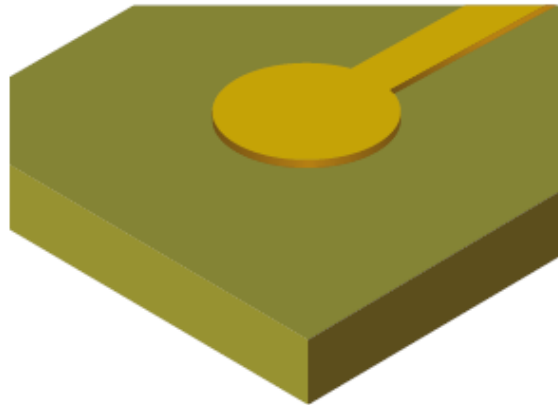


Figura 12: Remover fotoresistencia (Mitzner, 2009)

El **grabado mediante fresado mecánico** es una técnica que utiliza una computadora de control numérico (CNC) para fresar la placa. Esta máquina está programada con un mapa digital del circuito deseado y lo que hace es esmerilar el cobre no deseado, dando forma al circuito.

### **MÁSCARA DE SOLDADURA**

La definición que brinda el IPC <sup>13</sup> es: *“Un material de recubrimiento resistente al calor aplicado sobre áreas seleccionadas del circuito para evitar la deposición de material de soldadura en esas zonas durante el proceso de soldado posterior ”.*

Con la evolución en la tecnología de los PCB, actualmente se les pide a los recubrimientos de máscara de soldadura que brinden otras funcionalidades además de simplemente ayudar al momento de soldar componentes.

Cuando se usaron por primera vez máscaras de soldadura, la eliminación de los cortocircuitos era el objetivo principal. Sin embargo cuando el uso de la máscara de soldadura se hizo más frecuente y las propiedades del material mejoraron, este pasó a cumplir otros roles importantes, tales como proporcionar protección ambiental a la placa ensamblada, servir como una capa de resistencia para acabados finales y proveer protección dieléctrica.

### **ENSAMBLADO DE COMPONENTES**

Para que los PCB sean producidos en escala, la placa vacía tiene que ser fabricada bajo

---

<sup>13</sup> Association Connecting Electronics Industries, es una asociación comercial cuyo objetivo es estandarizar los requisitos de ensamblaje y producción de equipos electrónicos, Fundada en 1957.

ciertos estándares de tolerancia permitidos, o SFAs<sup>14</sup> como lo indica su sigla en inglés. La placa debe permitir el ensamblaje de diferentes componentes tecnológicos, estos deben ser colocados en la tarjeta sin que ambos sufran ningún tipo de daño. El ensamblaje de partes requiere un posicionamiento preciso de los componentes en la placa para que la junta de soldadura entre los cables y los Pads del PCB sea confiable y duradero.

El proceso de ensamblado automático (*pick and place*) se emplea tanto para dispositivos de montaje superficial, como para aquellos de montaje interno como llamados dispositivos PTH, que vinculan diferentes capas del PCB. Máquinas automáticas son programadas para extraer componentes de un carretel y localizarlos en la posición correcta de la tarjeta. Estas máquinas son capaces de colocar 40.000 piezas por hora.

## PROCESO DE SOLDADURA

Una vez que fueron montados los dispositivos, tanto los superficiales como los de orificio pasante (TH<sup>15</sup>), se emplea el proceso de soldadura por onda secuencial o reflujo. El proceso de soldadura es utilizado tanto para unir los diferentes dispositivos al PCB como para prever de conductividad eléctrica entre los componentes y el circuito impreso.

Para que la soldadura resulte exitosa un compuesto intermetálico o aleación debe formarse entre los conectores dispositivos y las trazas eléctricas del PCB. Para proteger las juntas de soldadura de la oxidación, las áreas de contacto en las placas son cubiertas por un acabado superficial. Existen diferentes métodos de acabado superficial que serán explicados en el próximo segmento.

Antes o durante el proceso de soldado, el área se limpia (desoxidado) con un flux que permite que la soldadura pueda fluir y humedecer la superficie.

Existen dos métodos generales de soldadura, un método es para *soldadura en masa* (que incluye, por onda, por reflujo de horno, por reflujo de vapor de fase y por reflujo de conducción) y otro el de *energía dirigida* (este incluye el método por aire caliente, barra caliente, laser y hierro). Solo se explicará brevemente cómo se realiza el método de *soldadura por onda*.

## SOLDADURA POR ONDA

---

<sup>14</sup> Standard Fabrication Allowances

<sup>15</sup> Through-hole devices,

Durante este proceso la tarjeta es fijada desde sus bordes a un transportador, este mueve la placa a través de una ola de material de soldadura fundido que solo alcanza la parte inferior del PCB. Los componentes pasantes (TH) son colocados arriba con sus conectores sobresaliendo por debajo y a medida que avanza la ola el material llena los agujeros y adhiere los componentes a la placa.

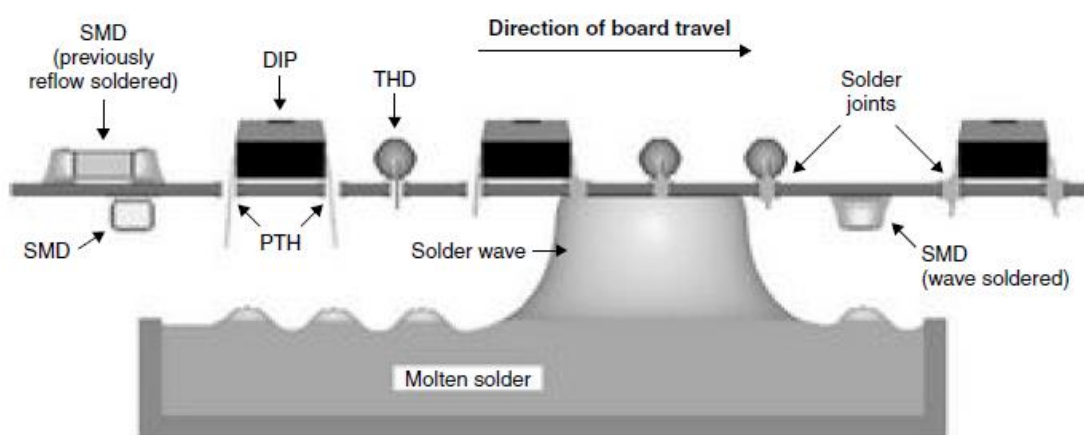


Figura 13: Cadena de montaje de PCB (Mitzner, 2009)

### 2.2.10 ACABADOS SUPERFICIALES

Cada placa de circuito impreso consiste en una pila de material aislante (fibra de vidrio) y capas conductoras compuestas de cobre. El cobre se oxida rápidamente, sus óxidos son químicamente resistentes lo que provoca una dificultad al momento de soldar sin el uso de un desoxidante agresivo (*flux*). El cobre se corroe con el paso del tiempo, ya sea por residuos sobrantes del proceso de fabricación, huellas dactilares (sales corporales) o contaminantes transportados por el aire. Por estas razones las trazas de cobre y las zonas de soldadura son protegidas mediante máscaras de soldadura, enchapado u otro tratamiento de superficie. En esta sección abordaremos los diferentes tipos de acabado superficial y las características que los fabricantes tienen en cuenta al momento de elegir un método.

- **Capacidad de prueba:** Define cuán susceptibles son a la corrosión los puntos de monitoreo que posee el PCB.
- **Tribología:** Las propiedades de fricción que deja el acabado superficial son importantes cuando se trata de conexiones por presión.
- **Costo:** Los costos de fabricación son muy diversos dependiendo del acabado.
- **Vida útil:** La capacidad de resistir a la oxidación y permanecer soldable.

- **Confiabilidad:** Se refiere a la resistencia de la soldadura resultante frente a los golpes, vibraciones y otros factores ambientales.
- **Resistencia a la corrosión:** Algunos acabados superficiales son más propensos a la corrosión que otros, como por ejemplo el de Inmersión en plata.

Los acabados superficiales más utilizados por la industria son los siguientes:

#### **HASL (HOT AIR SOLDER LEVELED SURFACES)**

El nivelado de superficie por soldadura de aire caliente fue, hasta hace algunos años, uno de los acabados superficiales más utilizados. Su popularidad estaba dada por su relativamente bajo costo, su fácil implementación y su efectiva resistencia a la corrosión. El deceso en la implementación se produjo dada la prohibición de la utilización del plomo para la fabricación de circuitos eléctricos, impuesto por las directivas RoHS y WEEE.

HALS utiliza un fluido eutéctico<sup>16</sup> de Estaño y Plomo (Sn-Pb) en donde la tarjeta limpia es sumergida unos segundos. Allí se produce una soldadura entre el cobre expuesto de la placa y la aleación. Luego de haber estado sumergida, esta se extrae y unas boquillas soplan aire caliente sobre las trazas dejando un espesor de aleación de varias micras (2 a 20) sobre estas.

#### **OSP (ORGANIC SOLDER-PRESERVATIVE)**

El conservado orgánico de soldadura es un recubrimiento que se le hace a las trazas y conectores de cobre de un PCB. Para dicho recubrimiento se utiliza un compuesto orgánico como el *benzotriazol*<sup>17</sup> o *imidazol*<sup>18</sup>. Este material se adhiere químicamente al cobre expuesto de las trazas y orificios pasantes que contiene la placa. Este mecanismo retarda la oxidación del cobre y está destinado a mantener la soldabilidad durante el reflujo de varios ciclos.

Sin embargo durante el proceso de soldadura, el recubrimiento orgánico se degrada con cada ciclo de reflujo. Vale destacar que según la complejidad de la tarjeta son necesarios diferentes etapas de soldadura, en cada etapa se aplica calor al material estresando al mismo

---

<sup>16</sup> Mezcla de dos componentes con punto de fusión (solidificación) o punto de vaporización (licuefacción) mínimo, inferior al correspondiente a cada uno de los compuestos en estado puro.

<sup>17</sup> El benzotriazol (BTA) es un compuesto heterocíclico que contiene un anillo de benceno fusionado a un anillo de 1, 2,3-triazol, con la fórmula química C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>N<sub>3</sub>. Este compuesto aromático y polar es incoloro y se puede utilizar en diversos campos.

<sup>18</sup> De estructura cristalina, su fórmula molecular es C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>N<sub>2</sub> y su masa molecular es 68.077 g/mol.

más y más con cada ciclo. En algunos PCB se utilizan hasta seis ciclos de reflujo para ensamblar componentes. Se debe tener en cuenta el tipo de desoxidante (Flux) a usar antes del proceso de soldadura, algunos tipos de Flux pueden reaccionar químicamente con el OSP y esto puede influir en la funcionalidad de proteger al cobre de la oxidación.

La principal deficiencia de este acabado superficial se centra en los orificios para testeo del circuito (ICT). Estos puntos están libres de soldadura y fluxes y a medida que el proceso de fabricación avanza van juntando capas de óxido. Para evitar esto muchos fabricante cobren los puntos de testeo con pasta de soldadura, sin embargo el uso masivo de este acabado radica en tarjetas que no requieran ICT, como en productos de consumo de gama baja.

### **ENEG (ELECTROLYTIC NICKEL/ELECTROLYTIC GOLD)**

Esta combinación de enchapado ha sido usada por mucho tiempo y es un acabado superficial de alta calidad, de alta confiabilidad y robustez en términos de soldabilidad y vida útil. Si bien la cantidad de Oro que se utiliza es pequeña, en el proceso de enchapado se utilizan químicos tóxicos que encarecen el producto.

El electro platinado de Níquel sirve como barrera entre el cobre y el oro. El niquelado se realiza para poder realizar una buena junta entre el oro y el cobre. Por sí solo el oro reacciona con el cobre a temperatura ambiente formando un compuesto intermetálico que requiere de una mayor temperatura de soldado y la utilización de **flux** <sup>19</sup> más potentes.

El principal inconveniente en este acabado es comúnmente reconocido por la industria y se debe a que el oro puede ser muy frágil en las juntas de soldadura, dependiendo de cuánto de este usando en el recubrimiento. Es por esto que un control estricto en el porcentaje empleado es necesario.

### **ENIG (ELECTROLESS NICKEL/IMMERSION GOLD)**

Como lo dice su nombre este es un tipo de acabado superficial de enchapado no electrolítico de Níquel con inmersión en oro. Esta es una alternativa más económica al electrolítico Ni-Au. Cuando el proceso de enchapado se realiza de forma correcta entrega una alta confiabilidad y excelente soldabilidad. En contrapartida a este tipo de acabado suele

---

<sup>19</sup> Un flux (derivado del latín fluxus) es un agente químico de limpieza, un agente fluyente o un agente purificador para realizar soldaduras de circuitos electrónicos".

atribuírsele una serie de desperfectos bien conocidos por la industria, llamados “*black-pad*”<sup>20</sup> o “*back line nickel*” y “*mud cracks*”<sup>21</sup>. Estos fenómenos se dan principalmente en placas que integran BGA<sup>22</sup> entre sus componentes.

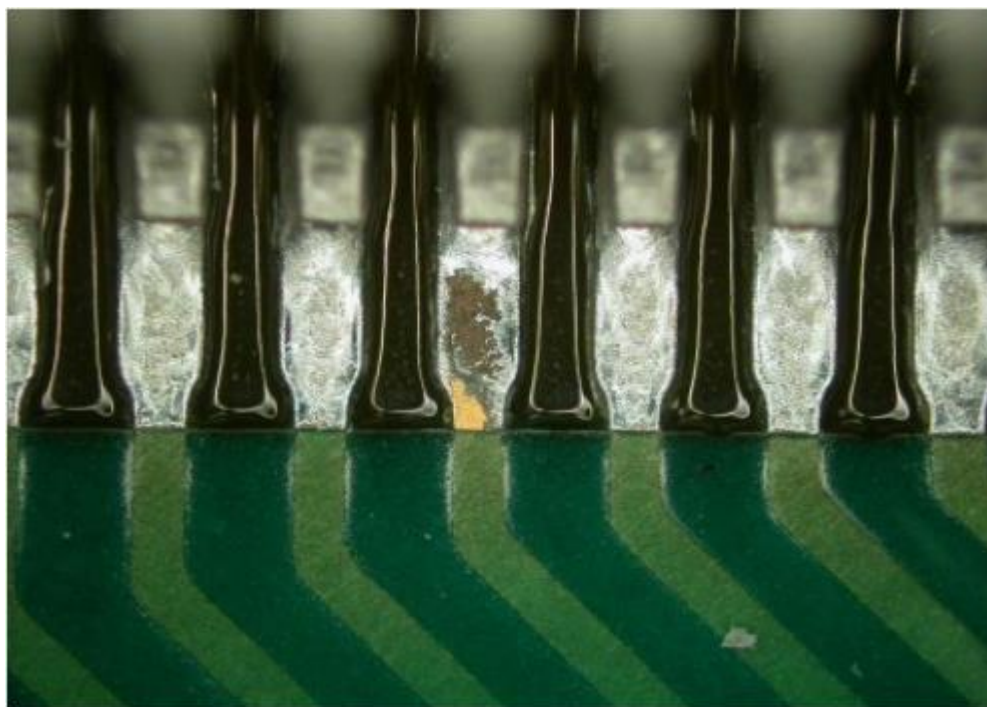


Figura 14: Síntoma de “*Back Pad*” en el circuito impreso de acabado superficial ENIG. Fuente: MCS

El defecto principal del ENIG se produce en la junta de soldadura, donde se produce un quiebre limpio del compuesto intermetálico formado entre la soldadura de los metales. Una vez que un componente en falla es removido del PCB, al conector afectado (*Back Pad*), no es posible volverlo a soldar.

### IMAG (IMMERSION SILVER)

Es un acabado superficial no electrolítico comúnmente usado en la industria, principalmente por no utilizar plomo en el proceso de soldadura. A pesar que posee alta soldabilidad y resulta

---

<sup>20</sup> Corrosión aguda de la capa de níquel, que hace que aparezca un color oscuro sobre el metal.

<sup>21</sup> Serie de grietas visibles en la superficie afectada que recuerda a grietas de barro.

<sup>22</sup> La matriz de rejilla de bolas o BGA (por sus siglas en inglés) es un tipo de encapsulado montado en superficie que se utiliza en los circuitos integrados, por medio de una serie de soldaduras las cuales se llevan a cabo mediante el calentamiento de bolitas de estaño.



excelente para las mediciones, pruebas y testeos del circuito, también posee algunos atributos negativos.

Tiene una vida útil de almacenamiento razonable, si es que se contiene en bolsas herméticas, pero es conocido por combinarse con contaminantes atmosféricos y generar sulfuros. El sulfuro de plata generado es resistente a algunos desoxidantes (*flux*) usados durante el proceso de soldadura.

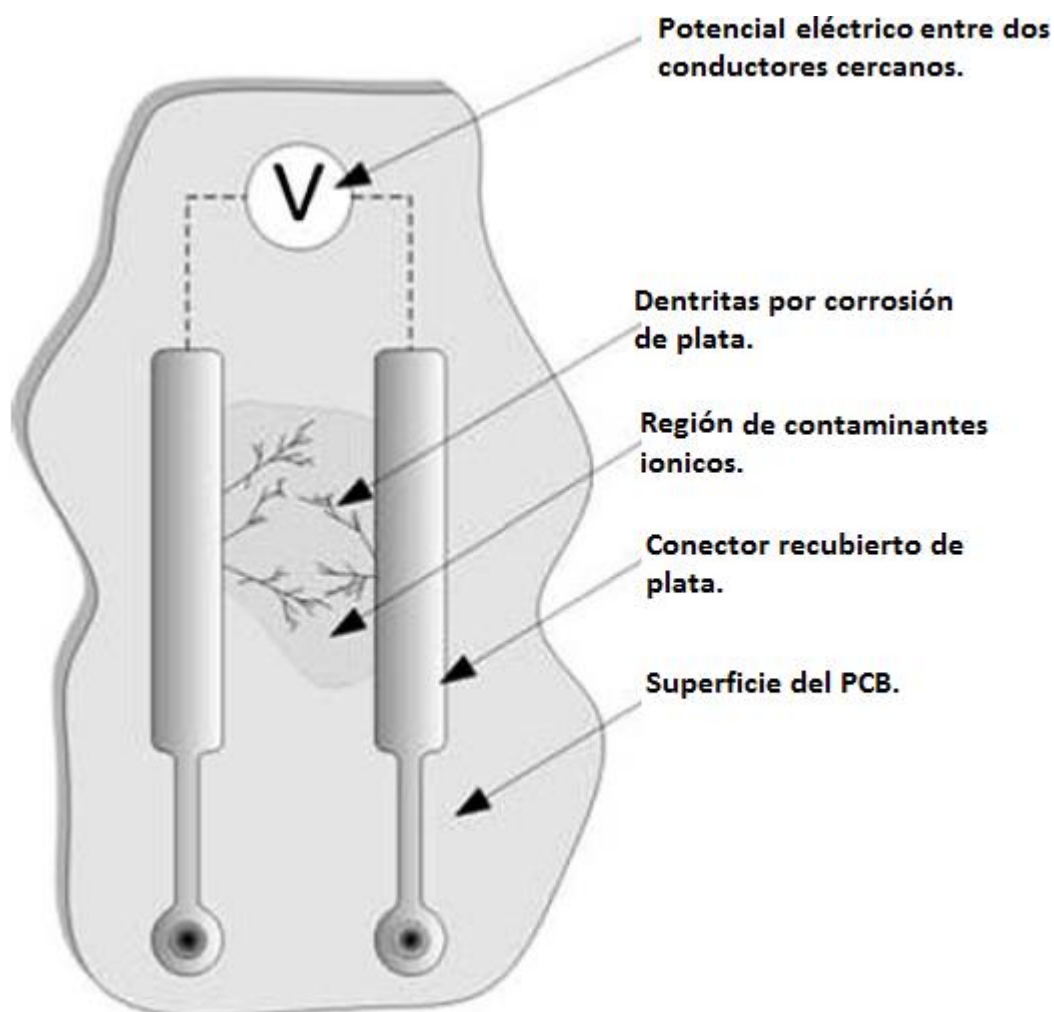


Figura 15: Estructura de PCB de Inmersión en plata (MCS)

Los iones de plata son conocidos por su movilidad en presencia de un campo eléctrico. Los residuos iónicos (Azufre, sales minerales) en una placa con recubrimiento de plata en conjunto con la humedad atmosférica pueden resultar en un proceso de migración electroquímica y corrosión de dendritas. Estos fenómenos pueden ser vistos sobre la superficie

de la placa afectada, pero también pueden ocurrir bajo la máscara de soldadura. Si las dendritas son lo suficientemente largas podrían causar un cortocircuito con otra traza adyacente, se produce entonces un proceso cíclico de crecimiento detrítico y fusión que puede complicar el diagnóstico de la falla.

## 2.3 ANÁLISIS DE LOS ACABADOS SUPERFICIALES

Según el reporte realizado por el ambiente científico y explicado en la conferencia titulada “RELIABILITY OF PCB ALTERNATE SURFACE FINISHES IN A HARSH INDUSTRIAL ENVIRONMENT” realizada en 2005, las placas analizadas fueron construidas utilizando distintos métodos de acabado superficial, para así poder determinar el impacto que los diferentes tipos de ambientes nocivos generan sobre ellas y elaborar conclusiones acordes a lo que el sector tecnológico necesita.

Los acabados superficiales analizados para un total de 16 placas de cada tipo fueron: OSP, ENIG, ImAg y ImSn

Las condiciones de entorno fueron las siguientes:

- 100 ppb H<sub>2</sub>S; 200 ppb NO<sub>2</sub>; 200 ppb SO<sub>2</sub>; 20 ppb Cl<sub>2</sub>;
- Temperatura = 28°C-29°C.
- Humedad = 75% RH
- Duración de la prueba = 20 días (480 horas)

### RESULTADOS OBTENIDOS:

Se analizaron 16 puntos de medición para cada acabado PCB (16 puntos por cada placa) observando claras diferencias en los tiempos de vida o período denominado “Hasta la falla” para cada una de las terminaciones de las placas.

Aquí debajo observaremos en un gráfico para cada uno de los tipos de acabado el tiempo en horas de funcionamiento.

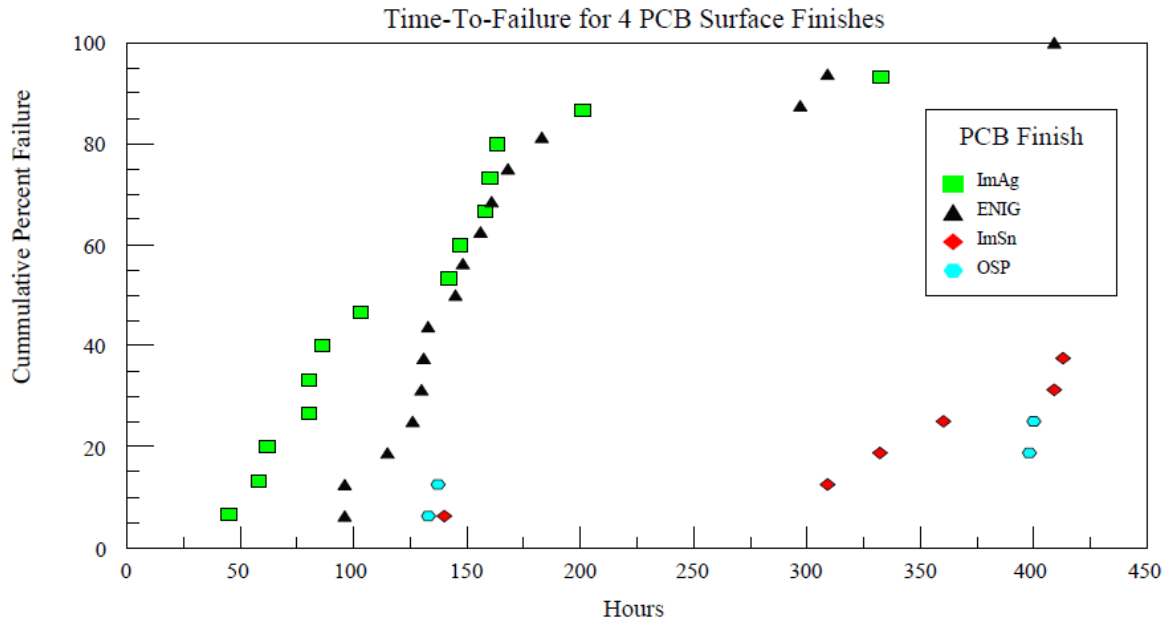


Figura 16: Tiempo de falla para los diferentes acabados superficiales. (Veale, 2005)

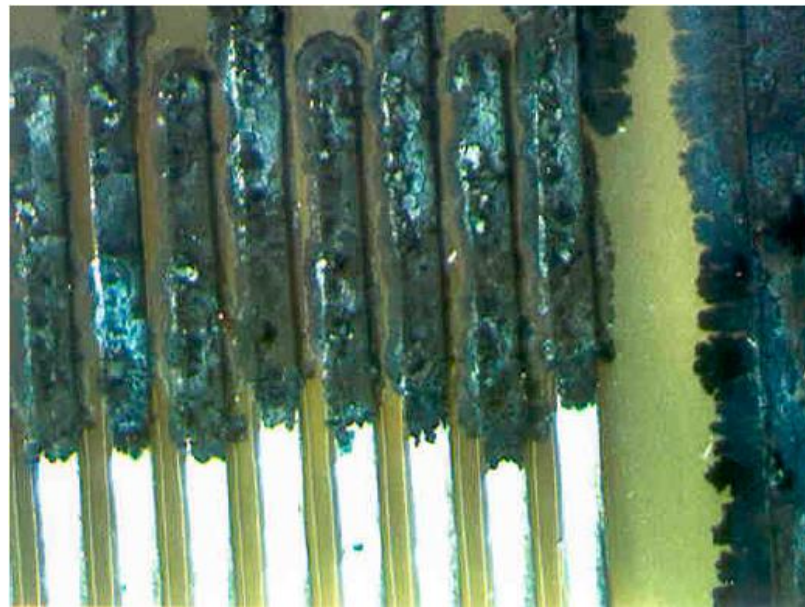


Figura 17: Superficie de placa con terminación ENIG. La misma fue la que presentó mayor nivel de deterioro. (Veale, 2005)

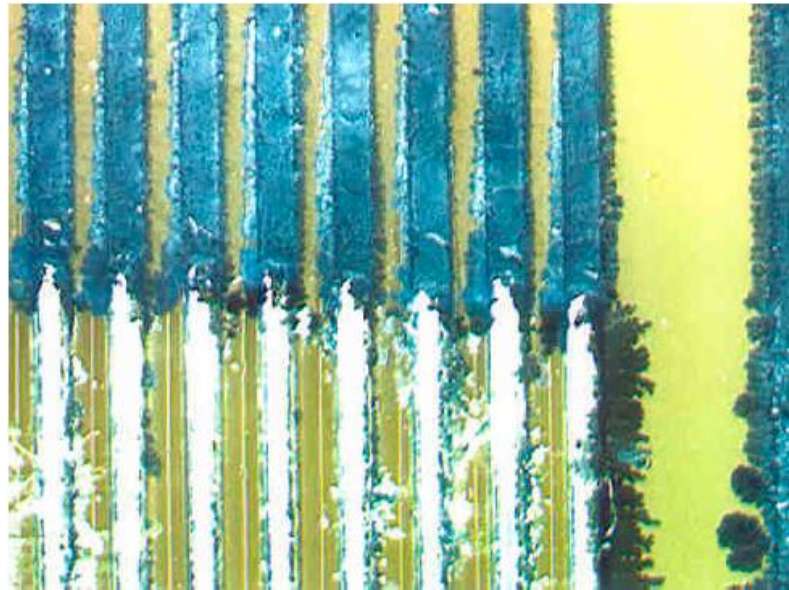


Figura 18: Superficie de placa con terminación ImAg. (Veale, 2005)

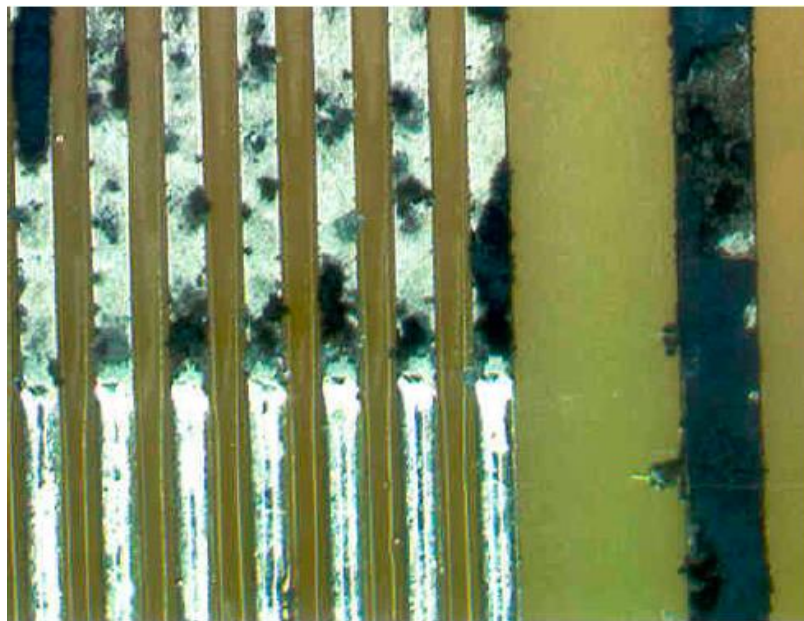


Figura 19: Superficie de placa con terminación ImSn (Veale, 2005)

En las Figuras de arriba se observa corrosión sobre las placas que se encuentran expuestas, sin embargo existe mayor protección en la inmersión en Estaño.

Para el caso de inmersión en plata (Figura 18) se observan ramificaciones (Denominado crecimiento dendrítico).

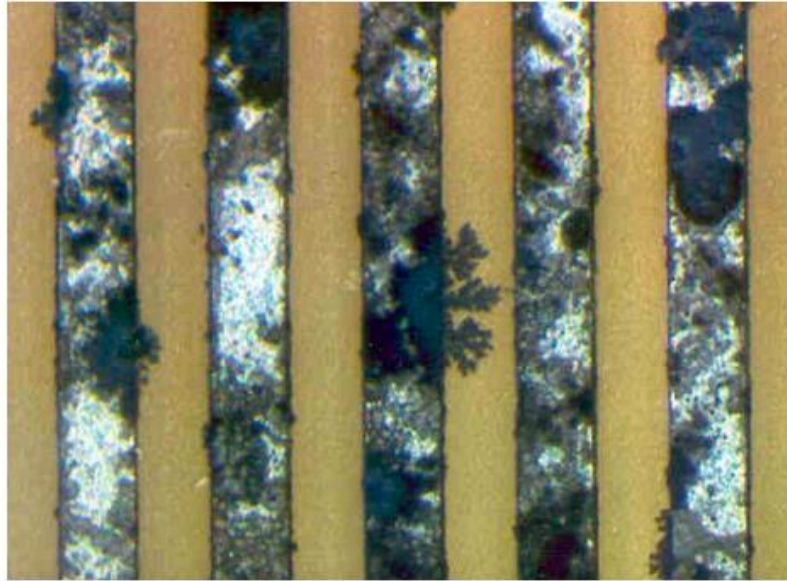


Figura 20: Circuito con terminación por inmersión Estaño. Se observa crecimiento dentrítico.  
(Veale, 2005)

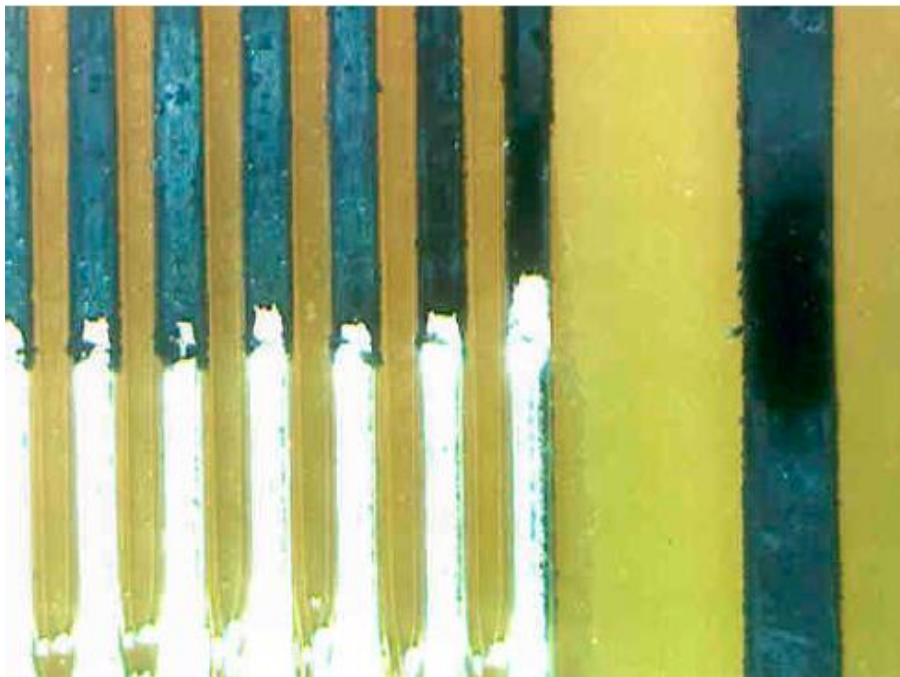


Figura 21: La terminación del tipo OSP presenta muy baja propagación de corrosión (Veale, 2005)

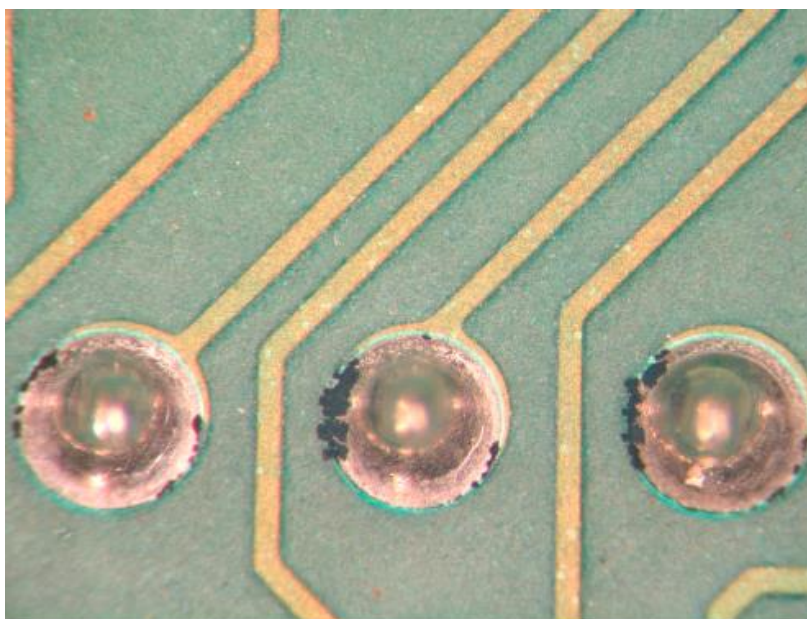


Figura 22: La terminación HASL presenta luego del estudio solo corrosión sobre los bordes de las terminaciones del circuito integrado. Presentó una buena performance comparativa para casos de ambientes  $G_x$ . (Veale, 2005)

## CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Luego de analizar e interpretar los resultados de las mediciones realizadas para definir y sentar postura acerca del comportamiento de las diferentes terminaciones al ser expuestas a un ambiente común el estudio realizado concluye que:

- Para el caso de un ambiente del tipo G3 todos los recubrimientos presentan fallas. La diferencia radica en el tiempo que debe transcurrir para que cada tipo de acabado superficial se deteriore y genere falla del circuito.
- Los tipos de recubrimiento OSP y por Inmersión en Estaño. Se comportan mejor que el resto para una región de tipo G2.
- Para los casos de ENIG e ImAg (inmersión en plata) no alcanza con que la región del entorno sea del tipo G2 ya que la alta tasa de falla persiste para este tipo de ambiente.
- El acabado superficial HALS resulta resistente a la corrosión incluso en ambientes del tipo  $G_x$ .

## 2.3 IMPACTO DEL DESEMPEÑO DE LOS PCB DEBIDO A LA NORMATIVA

## **AMBIENTAL**

Es comúnmente sabido en la industria que las directivas ambientales RoHS y WEEE lanzadas a principios del presente siglo tuvieron un impacto significativo en los procesos de fabricación de las placas de circuitos impresos. Esto se debió principalmente a la restricción del uso de Plomo para el proceso de soldadura y acabado superficial de las tarjetas electrónicas. El acabado superficial más implementado por la industria antes que las directivas ambientales fueran impuestas era el **HASL** (Hot Air Solder Leveled Surfaces). Para este método se utiliza una aleación de Sn-Pb para el proceso de soldadura, lo que resulta altamente eficaz a la resistencia de la corrosión causada por un ambiente con alta presencia de azufre en atmósfera. Además el proceso es relativamente barato y fácil de implementar por su alta humectación.

La industria llevaba más de 50 años de experiencia en la utilización de Estaño – Plomo para el proceso de fabricación de los PCB. Cambiar este proceso por nuevos materiales de soldadura, fluxes, terminaciones y temperaturas más altas de soldadura, en un tiempo de 1 a 2 años, era un riesgo a tomar. Muchos de estos inconvenientes fueron oportunamente resueltos, sin embargo hubo una falla no descubierta por la industria. El acabado superficial ImAg (Immersion Silver) fue y es el reemplazo más utilizado del método HASL. El proceso de fabricación del mismo es fácil, pero el revestimiento puede sufrir manchas y oscurecerse si se expone a un ambiente con precedencia de Azufre o Cloro. El oscurecimiento intenso puede ser indicador de corrosión que lleve a una posterior pérdida de funcionalidad.

Una típica falla que se da en el acabado superficial ImAg es producida por la antes descrita “*Creep Corrosion*”. Este fenómeno ocurre cuando el producto de corrosión (principalmente sulfuro de Cobre  $Cu_2S$  o sulfuro de Plata  $Ag_2S$ ) se arrastra a través de una superficie no corrosiva como un metal noble o un dieléctrico. Este producto de corrosión otorga un camino suficientemente conductor como para cortocircuitar trazas y pads en el PCB, generando graves fallas en la tarjeta. Humedad relativa por arriba del 50% genera que la conductividad del producto de corrosión aumente considerablemente lo que facilita al cortocircuito.

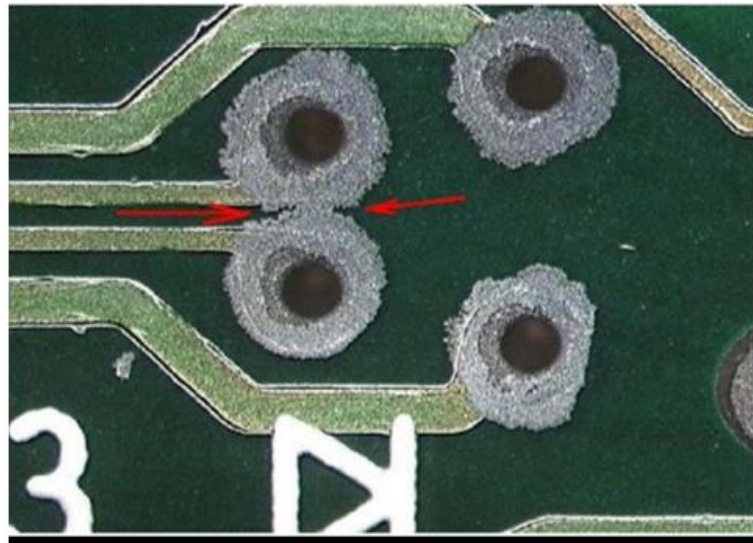


Figura 23: Clásica imagen de placa con *creep corrosion* (Schueller, 2018)

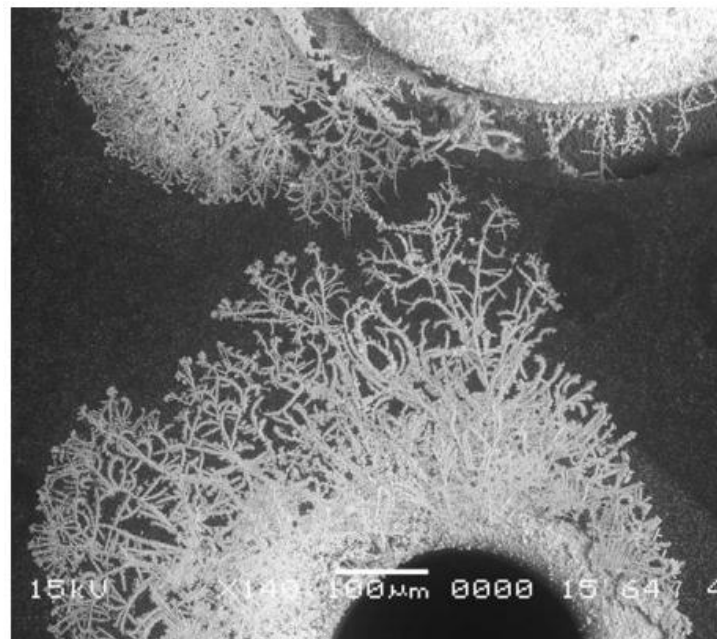


Figura 24: Imagen microscópica de *creep corrosión* (Schueller, 2007)

Existen varios tipos de compuestos sulfúricos que puede ocasionar corrosión ( $H_2S$ , Azufre elemental, compuestos de azufre orgánico y mercaptanos<sup>23</sup>) a este tipo de acabado

---

<sup>23</sup> En química orgánica, un tiol es un compuesto que contiene el grupo funcional formado por un átomo de azufre y un átomo de hidrógeno (-SH). Siendo el azufre análogo de un grupo hidroxilo (-OH), este grupo funcional es llamado grupo tiol o grupo sulfhidrilo. Tradicionalmente los tioles son denominados mercaptanos.



superficial. Estudios han demostrado que la tasa de crecimiento del  $\text{Cu}_2\text{S}$  aumente exponencialmente con una humedad relativa alta, mientras que el  $\text{Ag}_2\text{S}$  es independiente a dicha HR.

Si el principal producto de corrosión es el  $\text{Cu}_2\text{S}$ , nos podríamos preguntar por qué este tipo de corrosión afecta principalmente al acabado superficial ImAg. Entonces es necesario remitirse a la explicación de la “*Corrosion Galvánica*” descrita en la sección 2.2.2 *Tipos de Corrosion* del presente trabajo. Se puede resumir en que existe un potencial electroquímico generado entre los metales Cobre – Plata. El cobre es anódico respecto a la Plata, lo que resulta (sumergido en un electrolito) en un ataque corrosivo mucho más agresivo a este metal, dando como resultado más cantidad de  $\text{Cu}_2\text{S}$  respecto a  $\text{Ag}_2\text{S}$ .

### **RECOMENDACIONES EN EL DISEÑO DE PCBs CON IMAG**

Un estudio titulado *CREEP CORROSION ON LEAD-FREE PRINTED CIRCUIT BOARDS IN HIGH SULFUR ENVIRONMENTS*, publicado en Orlando Florida en el año 2007, hizo una serie de recomendaciones en cuanto al diseño de los PCBs que utilizan ImAg como acabado superficial.

- Trazas que no son de testeo deben cubrirse en un 100% con máscara antisoldante (Ver Fig 24).
- Los pads deben tener esquinas redondeadas y diseñadas para cubrirse completamente con pasta antisoldante.
- Los puntos de testeo libres de pasta antisoldante y recubrimiento deben estar separados al menos 2,5 mm para evitar los cortocircuitos producto de la corrosión.
- Existen múltiples recubrimientos (Coatings) en el mercado disponibles para aplicar en placas de circuitos impresos. Sin embargo son costosos y difíciles de aplicar para altos volúmenes. Es por eso que se recomienda aplicarlos para aquellas tarjetas las cuales sabemos que van a estar expuestas a un ambiente con alto contenido de azufre.

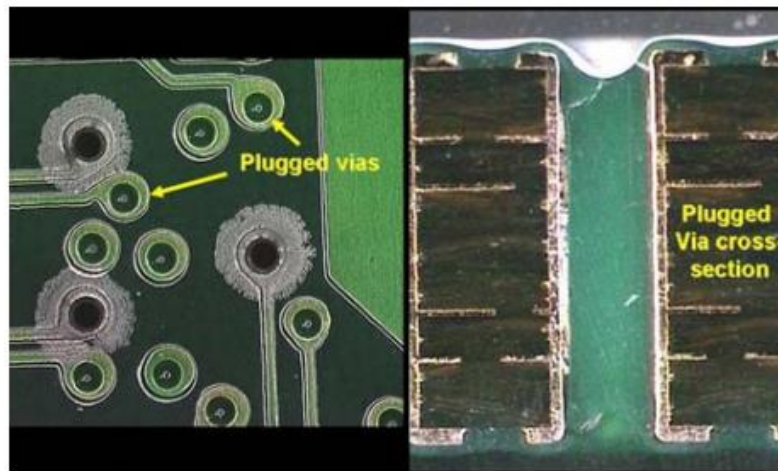


Figura 25: Thruholes recubiertos (Schueller R. , 2007)

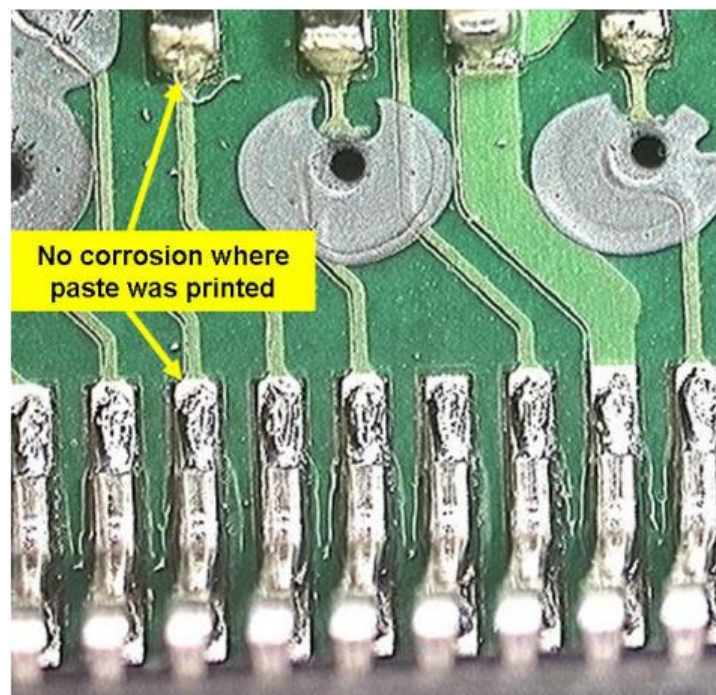


Figura 26: Máscara antioxidante (Schueller R., 2007)

### 3. HIPÓTESIS

Se plantearon diferentes hipótesis sobre las causas que generaban la altísima tasa de fallas sobre los equipos de telecomunicaciones desplegados en la red de transporte óptico del Operador.

#### 3.1 HIPÓTESIS NÚMERO 1

La causa de falla estaba dada por una mala conexión eléctrica del equipo.

### **3.2 HIPÓTESIS NÚMERO 2**

La causa de falla estaba generada por una mala conexión de puesta a puesta a tierra del equipo.

### **3.3 HIPÓTESIS NÚMERO 3**

La causa de falla estaba generada por un desperfecto en el lote de fabricación del equipamiento otorgado al operador.

### **3.4 HIPÓTESIS Número 4**

La causa de falla se debía a las condiciones ambientales desfavorables que provocan corrosión sobre el equipamiento.

## **4. METODOLOGÍA**

La metodología que se aplicó a los fines de confirmar o refutar las hipótesis planteadas se dividió en diferentes etapas:

- Caso de estudio “Vendor A” y “Operador X”
- Caso testigo Sitio Tipo A
- Caso De Estudio “Vendor B” y “Operador X”
- Resultados obtenidos y su análisis.
- Mejoras propuestas en los shelters.
- Resultados luego de la implementación de mejoras.

### **4.1 CASO DE ESTUDIO “VENDOR A” Y “OPERADOR X”**

Lo que motiva la realización del primer caso de estudio es un sitio en particular ubicado en la localidad de San Antonio de Areco, Provincia de Buenos Aires. Este sitio era uno de los primeros en poseer tráfico y clientes conectados a la red por lo que tenía muchísima prioridad y foco puesto tanto por parte del operador como del proveedor de los equipos y, principalmente, una elevadísima tasa de fallas.

Al repasar la historia del sitio es importante destacar que una vez puesto en servicio,

luego de 6 meses de instalado y funcionando sin tráfico ni fallas, los equipos comenzaron a presentar problemas persistentes en un determinado tipo de placa que llamó la atención, en un principio. Pero la urgencia en dar servicio de alta disponibilidad, sumado además a una alerta de fábrica por un posible problema de software, generó que la causa raíz no se buscara en ese momento sino que se avanzara con el recambio de las placas en falla y envío de las mismas a fábrica para recambio preventivo.

Dos meses más transcurrieron hasta que volvieron a aparecer fallas recurrentes en los dos equipos antes mencionados y en servicio dentro del nodo. En principio, los problemas al convertirse ahora en recurrentes dispararon acciones de reemplazo de placa nuevamente, pero esta vez, se decidió avanzar en el análisis del sitio previo compromiso de la alta gerencia para avanzar.

Se comenzó por analizar y poner foco sobre posibles problemas eléctricos en el *shelter*, puestas a tierra, protecciones con anillos dentro y fuera del sitio, equipotencialización de las tierras.

Debido a que el sitio presentaba deficiencias respecto al sistema de estabilidad eléctrica y protecciones correspondientes, se decidió, en este segundo avance de análisis, realizar el recambio completo de uno de los dos equipos incluyendo no solo las placas sino el chasis por completo.

El resultado de este segundo avance en la búsqueda de corregir por completo los problemas del sitio en principio funcionaron de manera correcta ya que las fallas desaparecieron y el servicio se restableció con los SLA (Service Level Agreement) comprometidos con el cliente.

Finalmente, y luego de dos meses del último incidente, una nueva falla masiva en el equipo determinó realizar una comunicación formal tanto a la alta gerencia del operador, como al proveedor del equipo. De esta manera, se intentó involucrar tanto al grupo de calidad de producto, como a especialistas en calidad de entorno e infraestructura y así encontrar una solución superadora al problema.

Luego de varias idas y venidas finalmente ambas altas gerencias definieron compartir y aunar esfuerzos en la resolución del conflicto. Mediante una investigación se esperaba determinar el origen de las fallas y una vez hallada, avanzar en la solución que permita brindar estabilidad a la red, y más aún, poder honrar los compromisos con los clientes.

## **DEFINICIÓN DEL MARCO DE INVESTIGACIÓN**

Inicialmente se pensó en analizar las placas en falla, que para ese momento, se encontraban en el circuito de reparación en los centros de reparación de Italia y/o Estados Unidos, por lo que, al involucrar a los responsables de reparaciones, se les pidió inspección visual de las placas y, a su vez determinar naturaleza de la falla. Se determinó este procedimiento debido a que al fallar en campo (en funcionamiento) en general presentaban el síntoma de dejar de funcionar de un momento a otro sin lograr volver a levantar o encender, o bien poder ingresar a las mismas para analizar posible falla de software. Esto nos dio el puntapié inicial para trabajar sobre una posible segunda hipótesis de que la falla no tenía que ver con un problema eléctrico, ni tampoco con un problema del software por lo arriba mencionado.

Con el análisis a nivel físico como premisa y las placas en los centros de reparación en el exterior se lanzó el primer relevamiento e inspección visual de las mismas donde se observó, al desarmarlas, corrosión en alguna de ellas. Esta corrosión era alta en algunas placas, en otras presentaba deterioro medio y, por otra parte, algunas de ellas no presentaban síntomas de corrosión.

Ante la duda, se definió primero que nada iniciar el análisis de estabilidad eléctrica de la sala que presentaba mayor tasa de fallas. Como consecuencia observamos que la sala posee un sistema de protección instalada en el pilar de acometida y también protección en el tablero general por lo que rápidamente se minimizó la posibilidad de que el problema de sobretensión externa existiera para el sitio analizado.

## **ANÁLISIS INICIAL**

A 1 año del inicio de las fallas como fue mencionado en el marco de investigación, se presenta el análisis realizado fruto de seguimiento de cada una de las fallas detectadas en la red durante un año de recopilación histórica. En la Figura 27 se puede observar donde se tienen picos de fallas para poder realizar un análisis de Ishikawa y así determinar posibles causas raíces del problema, y por supuesto detectar los sitios que primero se deberían atacar en pos de corregir el problema.

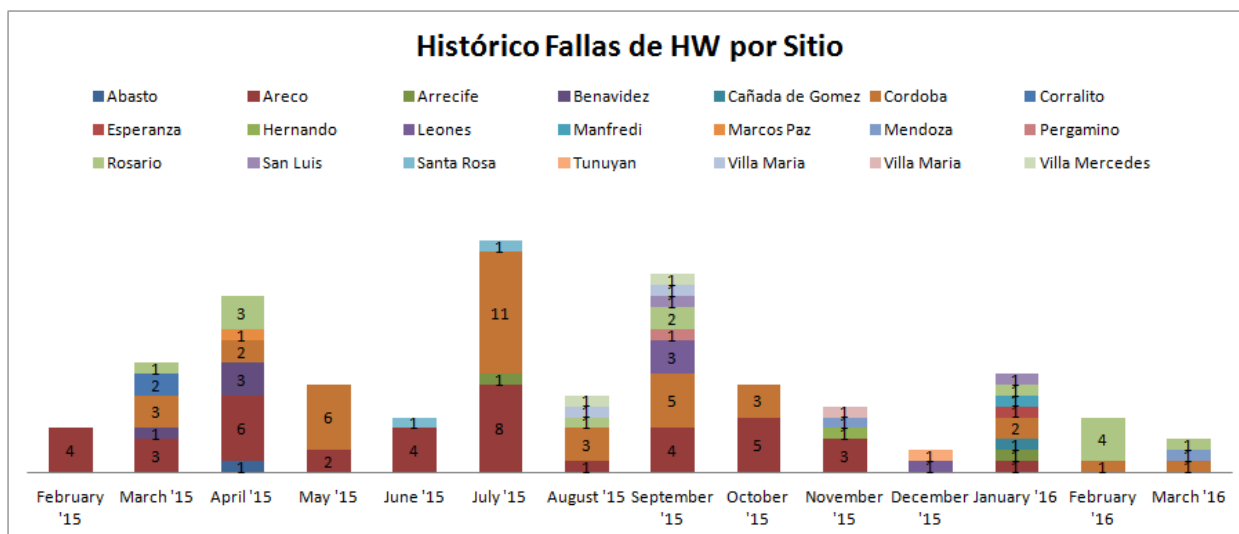


Figura 27: Histórico de fallas mensual por sitio. Investigación por parte de los alumnos.

En función de las variables analizadas en la red de transmisión que fue objeto de la investigación decidimos generar un diagrama de Ishikawa para trabajar sobre todas las variables que contemplamos como posibles en los siguientes aspectos:

- Metodológico. Todo lo referido a posibles errores o desvíos propios de una manipulación, medición o análisis sobre la muestra. En este punto todos los procesos fueron revisados y validados en dos ocasiones, con todos los actores involucrados en el problema, con conocimiento técnico para evitar posibles malas interpretaciones de los datos o información errónea producto de la metodología empleada.
- Ambiente. Con respecto al ambiente se tomaron todas las posibles variables que, a priori, se cree que influyen sobre el funcionamiento de los equipos.
- Mantenimiento. Se revisó tanto a nivel procedimental como conocimiento técnico y de operación propia de la red para evitar que por una deficiencia en la operatoria diaria en el mantenimiento de la red fuera la causante de la elevada tasa de falla encontrada.
- Equipamiento. Se analizaron todas las variables que involucran equipamiento dentro de los nodos para explorar la posibilidad de que alguno de los elementos encontrados en el sitio pudiesen causar la elevada tasa de falla antes mencionada.

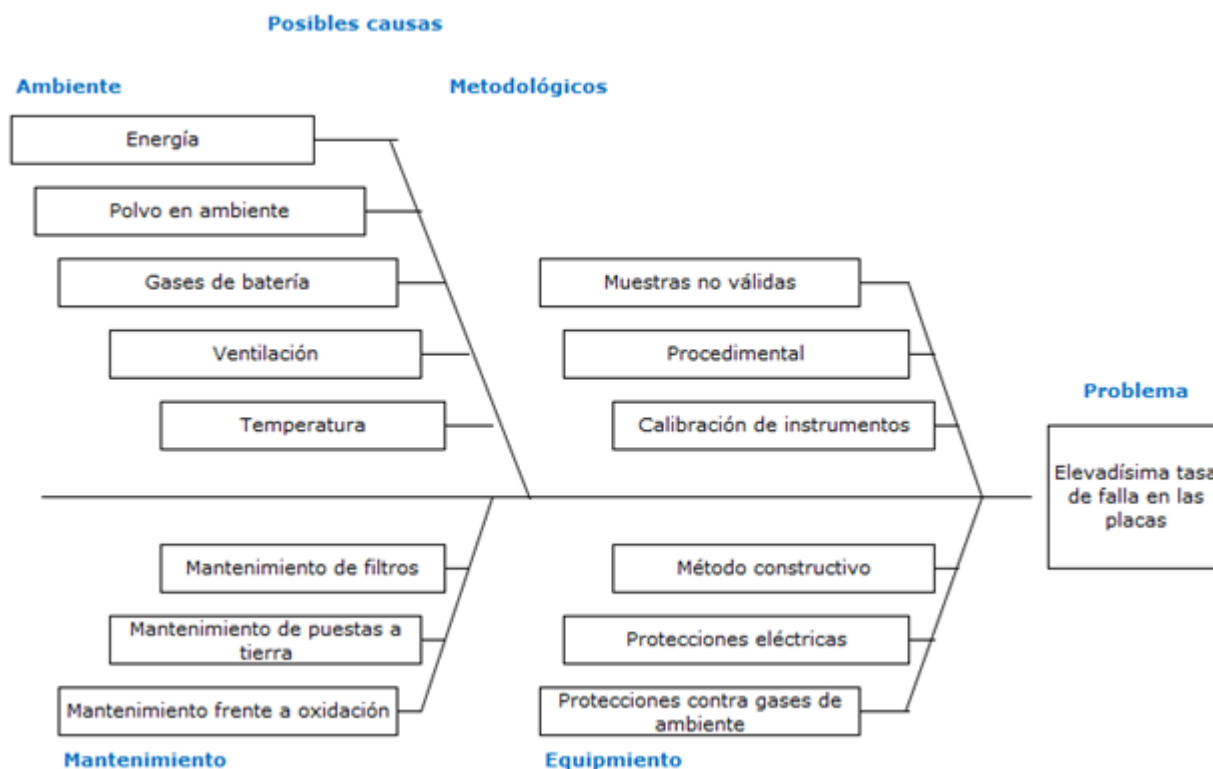


Figura 28: Diagrama de Ishikawa. Investigación por parte de los alumnos.

## DISTRIBUCIÓN DE FALLAS POR SITIO

En paralelo se procede a determinar claramente mediante un diagrama de torta la tasa de falla por sitio para enfocar el análisis en dichos sitios (Figura 29). Esta determinación se ve impulsada principalmente por dos factores:

- Disponibilidad de servicio sobre la red. Los sitios con mayor tasa de fallas deben corregirse antes que el resto ya que sus fallas no permiten disponibilidad de servicio y funcionamiento de la red.
- Costo generado por la alta tasa de falla. Tanto el costo asociado por equipamiento como el costo asociado a mantenimiento y operación de sitios para realizar reemplazo de placas se convierte para el caso de esos sitios en el más elevado de la red.

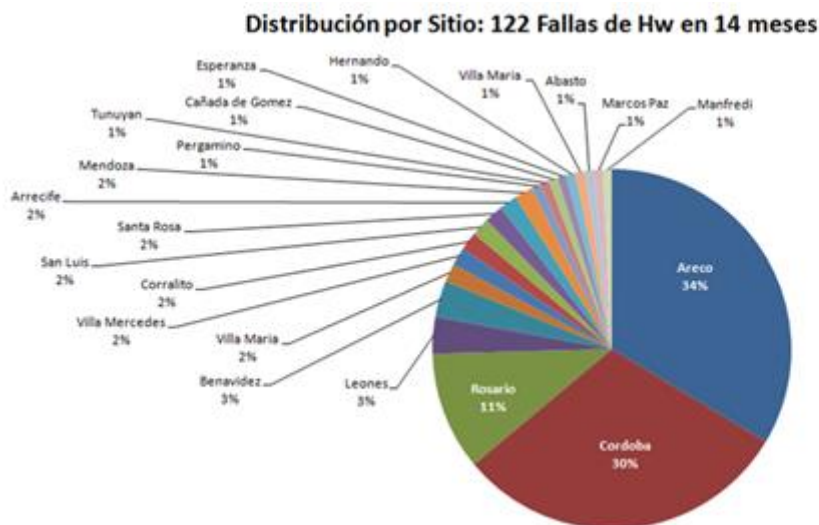


Figura 29: Diagrama de fallas por sitio. Investigación por parte de los alumnos.

### TIPO DE SITIOS/NODOS INVOLUCRADOS

Se trabajó en identificar más allá de la tasa de falla por sitio y la temporalidad de dichas fallas, el tipo de sitio involucrado en la falla ya que la red analizada presentaba dos tipos de nodos a los cuales llamaremos Nodos A y Nodos B.

Como resulta evidente del gráfico propuesto (Figura 30), el análisis va a enfocarse sobre los sitios/nodos tipo A ya que traen aparejados más del 90% de las fallas.

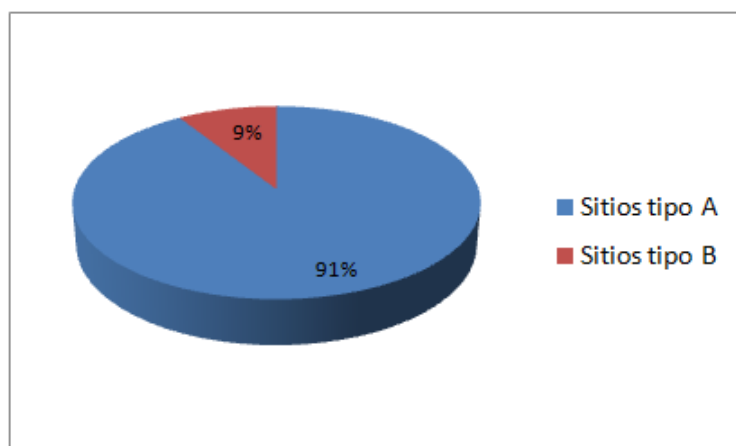


Figura 30: Porcentaje de fallas por tipo de sitio. Investigación por parte de los alumnos.

Más adelante en la investigación detallaremos las características de los nodos, así como también las particularidades de los sitios/nodos testigos tomados en cuenta para la detección de



la causa raíz. En principio, se procederá a dejar lo más clara posible la foto de la red con los patrones hallados y las líneas de investigación propuestas para luego enfocar sobre las causas raíz del problema para los casos particulares considerados.

### **MUESTRAS (VÁLIDAS-NO VÁLIDAS):**

Para el caso del tipo de muestra se define muestra válida a toda aquella muestra que cumpla con las siguientes condiciones:

- Se debe poder contar con el detalle de fecha de instalación y fecha de falla.
- Se debe contar con la información de la fecha de retiro de la misma de sitio para ingreso a circuito de reparación para evaluar el tiempo o no que estuvo en el ambiente a analizar previo al inicio del análisis.
- Se debe contar con información fehaciente acerca de la manipulación correcta de las mismas durante el proceso de retiro y envío al centro de reparaciones.
- Cabe mencionar que se define como correcta manipulación a un correcto retiro del nodo, embalaje en bolsa antiestática para luego colocar en caja de cartón que evite que la caja continúe en contacto con el medio ambiente durante el traslado tanto como se pueda.

### **CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS /CUPONES**

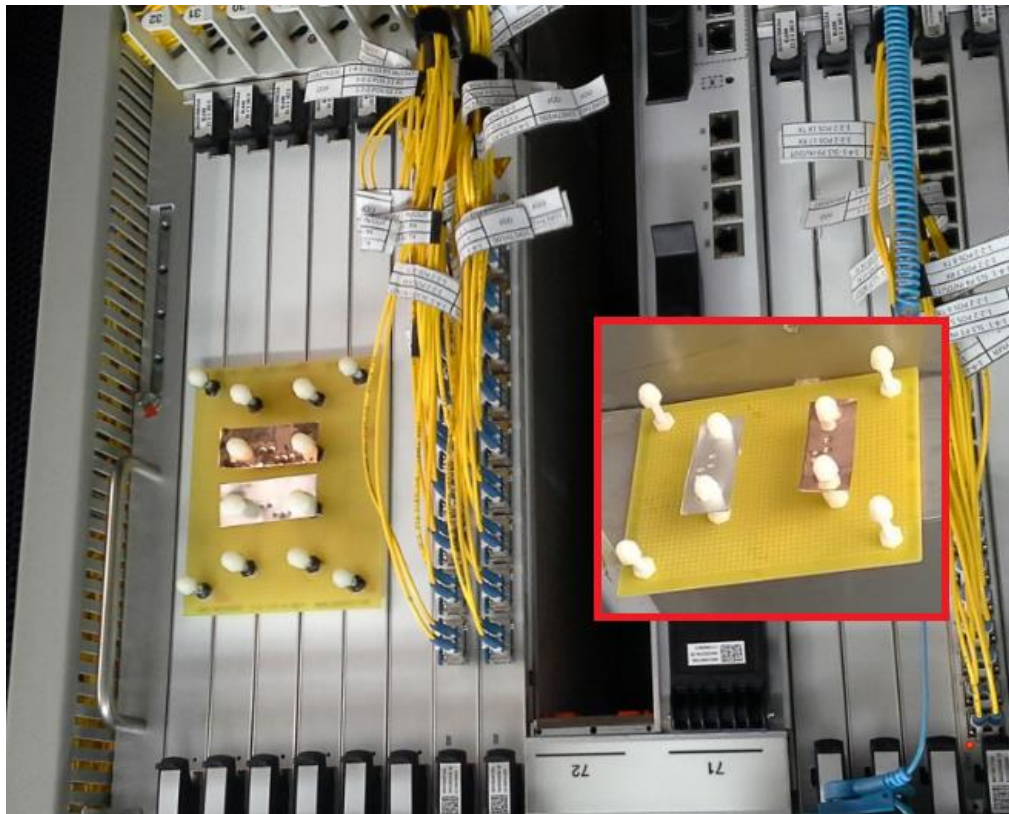


Figura 31: Instalación de cupones. Imagen tomada por parte de los alumnos.

### **ON-GUARD 4000**

A modo de acelerar los ensayos y mediciones de calidad de aire dentro de los sitios se decidió la compra durante el proceso de investigación de un equipo On-Guard 4000. Este permite realizar mediciones de estado del ambiente en tiempo real y tomar muestras en 72Hs. A diferencia de los cupones los cuales necesitan al menos dos semanas de exposición para determinar de manera fehaciente la velocidad de corrosión que presenta el ambiente.



Figura 32: Imagen de equipo OnGuard4000 para medición. (<https://www.purafil.com>)

#### **DATALOGGER (MEDICIÓN Y CONTROL DE HUMEDAD Y TEMPERATURA):**

Se utilizaron dataloggers *Omega Nomad Data Logger* que fueron los recomendados por especialistas de Nokia-Bell. Estos permiten tomar mediciones de temperatura y humedad, almacenarlos en su memoria interna y son incorruptibles. Los mismos se colocaban junto a los cupones para, luego de la medición, ser enviados para análisis.



Figura 33: Imagen de Dataloggers Omega. (<https://es.omega.com>)

#### **PROCEDIMENTAL**

Con respecto al procedimiento se trabajó en conjunto con Bells Labs e INTI para definir acuerdos en la metodología a emplear para el cálculo del impacto de sustancias agresivas que impactan en la vida útil de los circuitos electrónicos instalados en los sitios.

Cabe destacar que ASTM es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Existen alrededor de 12.575 acuerdos voluntarios de normas de aplicación mundial. Las oficinas principales de la organización ASTM internacional están ubicadas en West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos, al noroeste de la ciudad de

Filadelfia y, para el caso de estudio en cuestión, se acordó trabajar sobre la norma de acuerdos ASTM para reducción catódica de las placas/cupones que se encuentran/ron instalados en los sitios.

Esto permite trabajar sobre los mismos conceptos a la hora de analizar y definir resultados de las muestras obtenidas en campo.

El procedimiento a grandes rasgos involucra la exposición de cupones de plata y cobre en el sitio a medir para luego proceder a la reducción catódica de los mismos según los siguientes pasos expuestos en la normativa:

- Coulometría de corriente constante; una reducción de corriente fija densidad se aplica a la muestra en una solución electrolíticamente conductora.
- Las variaciones resultantes en el potencial medido frente a un electrodo de referencia estándar en la misma solución son seguidos como una función del tiempo para determinar la velocidad de corrosión que presenta el sitio por análisis de estos cupones.

### **¿Por qué mediciones en paralelo de cupones, más humedad y temperatura?**

Según lo expuesto en el marco teórico del presente trabajo, los agentes catalizadores o generadores de corrosión en equipamiento electrónico son la contaminación en el ambiente, la temperatura a la cual se encuentran expuestos los equipos y la humedad relativa.

Es por esto que se han realizado durante los ensayos mediciones no solo de velocidad de corrosión y mediciones de agentes contaminantes en ambiente sino también mediciones de humedad relativa y temperatura que influyen en el proceso corrosivo.

Más allá de lo mencionado en el párrafo anterior, hay algunos resultados interesantes, observaciones y conclusiones que sí podemos sacar con la medición únicamente de cupones. Aquí un breve repaso sobre las mismas:

- Para ambos tipos de cupones, de plata y cobre, cuando se encontró una única formación de película (de un único agente contaminante) luego de la exposición de los mismos se puede confirmar que el ambiente no es sumamente agresivo para la instalación de equipamiento electrónico (Se determinaron como ambientes  $G_2$ ).
- Para el caso del cupón de cobre se encuentra que la mayoría de los casos sólo se presenta oxidación ( $Cu_2O$ ) mientras que casi un tercio de los ensayos arrojan que para la plata el compuesto formado es el  $Ag_2S$  por ende se puede confirmar que ambos cupones fueron expuestos a ambientes con únicamente el  $SO_2$  como agente contaminante.

- Se demostró que la presencia o ausencia de cloro en el ambiente no puede ser confirmada o desechada en caso de no encontrar evidencia en los cupones. Más allá de eso en los cupones de plata se suele detectar la presencia del mismo.

Como conclusión general se llega a que utilizando ambos tipos de cupones de plata y cobre en forma paralela nos permite caracterizar de manera muy fiel y acertada el ambiente, tipo y severidad de los agentes contaminantes presentes en el entorno de medición.

La medición con ambos cupones nos permitirá también recomendar de manera más efectiva todo tipo de acción correctiva con el menor costo posible.

Finalmente se destaca que para casos en los que se quiera un aún mayor nivel de certezas y detalles acerca del entorno se recomienda realizar mediciones agregando a los dos cupones antes mencionados un tercer cupón de medición de oro.

Más adelante en el desarrollo del trabajo daremos ejemplos de mediciones e impacto sobre los diferentes tipos de cupones aquí presentados.

## **ANÁLISIS DE PLACAS QUE MUESTRAN CORROSIÓN**

Como primer análisis se definió avanzar sobre placas de 3 de los nodos con mayor tasa de falla: Estos fueron Rosario, Córdoba y Areco. Para el caso de estos tres nodos se enviaron placas para la realización de pruebas de funcionamiento luego de una preliminar inspección visual que nos permite confirmar la presunción de corrosión sobre las mismas:

A continuación, el detalle fotográfico de placas que presentan un elevado nivel de corrosión de los sitios arriba mencionados:

- 11 placas del nodo Areco.
- 13 placas del nodo Córdoba.
- 9 placas del nodo Rosario.

Ejemplos de las imágenes obtenidas de las placas correspondientes en los nodos mencionados anteriormente:

Placa para transmisión óptica de 24 puertos número de serie EZ133630356

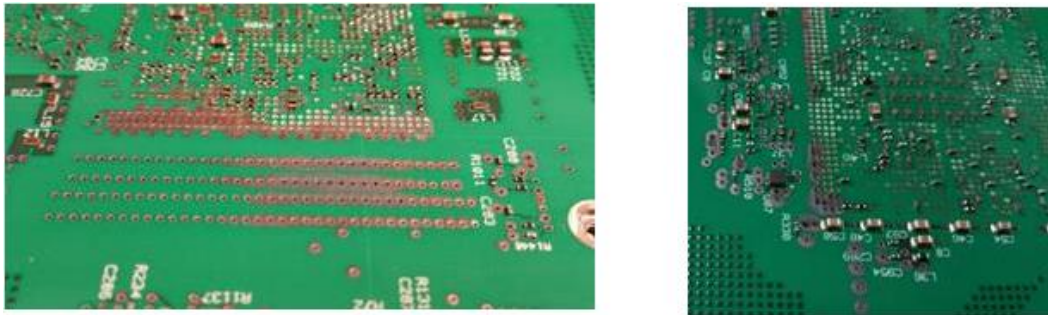


Figura 34: Inspección visual realizada por los alumnos.

Placa para transmisión óptica de puertos de 40 GB ópticos número de serie EZ133630356

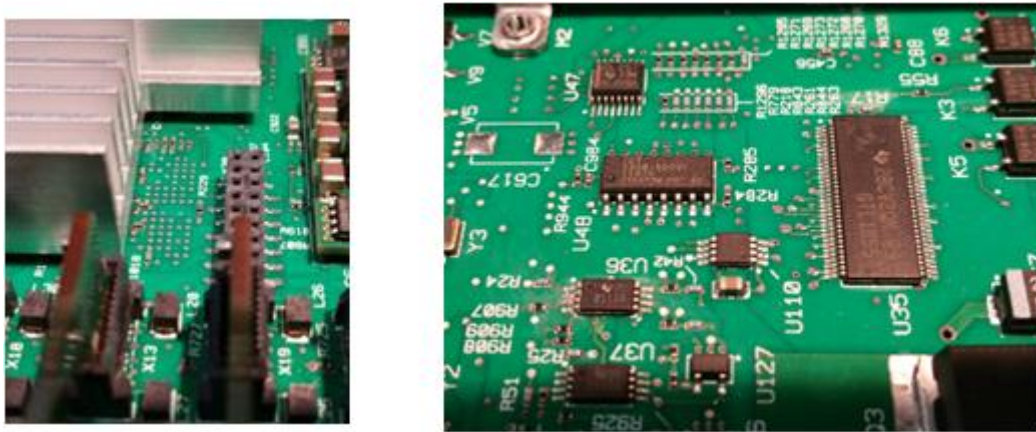


Figura 35: Inspección visual realizada por los alumnos.

Placa matriz de conmutación número de serie EZ1306A5929

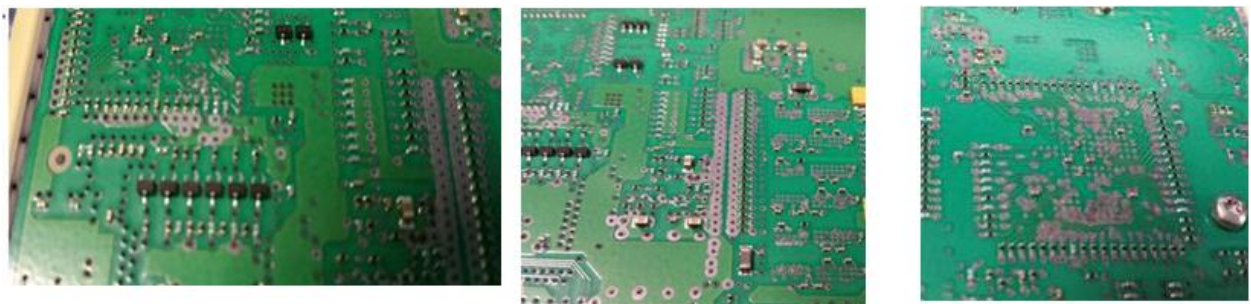


Figura 36: Inspección visual realizada por los alumnos.

Una vez encontrada la corrosión sobre las placas, se definieron y dispararon una serie de posibles causas y análisis de las mismas. A grandes rasgos, se determinó dividir la investigación en dos grandes grupos y empezar a desarrollar cada uno de los aspectos analizados e investigados.

Por un lado y puertas adentro de la organización, se definió analizar la metodología de fabricación, procesos de ensamble de placas, posibles protecciones y niveles de tolerancia a diferentes ambientes de las mismas. Además, se enviaron notas a los proveedores vitales exigiendo conformidad y validez de estándares internacionales dentro de su proceso productivo.

Por otro lado, se realizó una intensiva planificación de medio ambiente y como este podía influir sobre las placas. El mismo tuvo tres grandes ejes de análisis:

- Posibles agentes contaminantes dentro de los nodos/sitios afectados.
- Definición del mapa por tipo de ambiente geográfico ya que, dependiendo de las condiciones climáticas y geográficas de los nodos se pueden establecer niveles de agresividad del medio ambiente que presenta cada geografía en la Argentina.
- Investigación de fechas con elevada tasa de falla y comparativa versus condiciones climáticas para establecer posibles correlatos (Fuertes lluvias, inundaciones, sequías, altas temperaturas, etc).

Cabe destacar que la directriz del análisis se llevó adelante teniendo durante todo el proceso un seguimiento de tres variables que son claves en la determinación de la velocidad de corrosión: Temperatura, humedad y presencia de sulfuros o clorhídricos en ambiente que, como hemos fundamentado en el marco teórico, son los tres parámetros que definen la velocidad de corrosión de un circuito electrónico.

## **PARTES INVOLUCRADAS EN EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Se involucró del lado del proveedor a especialistas de calidad de producto de la unidad de negocios de transporte de la compañía y a un especialista de Bells Labs<sup>24</sup>, Doctor en Química y prestigioso investigador de dichos laboratorios. Por otro lado, se involucró por parte del Operador de servicios a especialistas en calidad de satélites y desarrollo de equipamiento satelital para validar conceptos y contraponer posiciones a la hora de realizar la investigación. Por último, como tercer posición y arbitrando entre los mencionados actores se definió a un

---

<sup>24</sup> Nokia Bell Labs (anteriormente llamados AT&T Bell Laboratories, Bell Telephone Laboratories y Bell Labs) es una compañía estadounidense de investigación y desarrollo científico, propiedad de la empresa finlandesa Nokia.

organismo muy prestigioso en Argentina como lo es el INTI. Dentro del INTI<sup>25</sup> se definió a los responsables del departamento de procesos superficiales dentro de la comisión de materiales industriales, Quienes poseen un amplio conocimiento sobre agentes contaminantes y la posible causa de fallas en equipos electrónicos de uso industrial dentro de Argentina.

#### **4.2 CASO TESTIGO SITIO TIPO A**

Luego de las mediciones realizadas hemos observado que la tasa de falla en los shelters del tipo A tienen altísima relación con el entorno y más precisamente con la contaminación ambiental que se ha medido dentro de los shelters testigo.

El caso testigo fue el del nodo que presentaba la mayor tasa de falla dentro de la red el cual tiene la característica de ser del tipo A y estar ubicado en una zona geográfica donde la humedad del medio ambiente es alta con respecto a otras geografías de la Argentina (mencionamos el caso de la humedad ya que, como hemos aclarado en las definiciones de corrosión, es un catalizador del avance de la misma).

#### **LOCALIZACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN**

En primera instancia se definió y avanzó con la instalación de los equipos de medición tanto fuera como dentro del shelter A. Para la primera ronda de mediciones se instalaron dos adquisidores de datos (*dataloggers*), uno dentro del sitio y uno fuera que permitiera concluir respecto a la relación que establece el shelter con el medio que lo rodea.

---

<sup>25</sup> Se trata de un ente autárquico que funciona bajo la órbita del Ministerio de Producción, cuya misión es acompañar e impulsar el crecimiento de las pymes argentinas, promoviendo el desarrollo industrial federal mediante la innovación y la transferencia de tecnología.



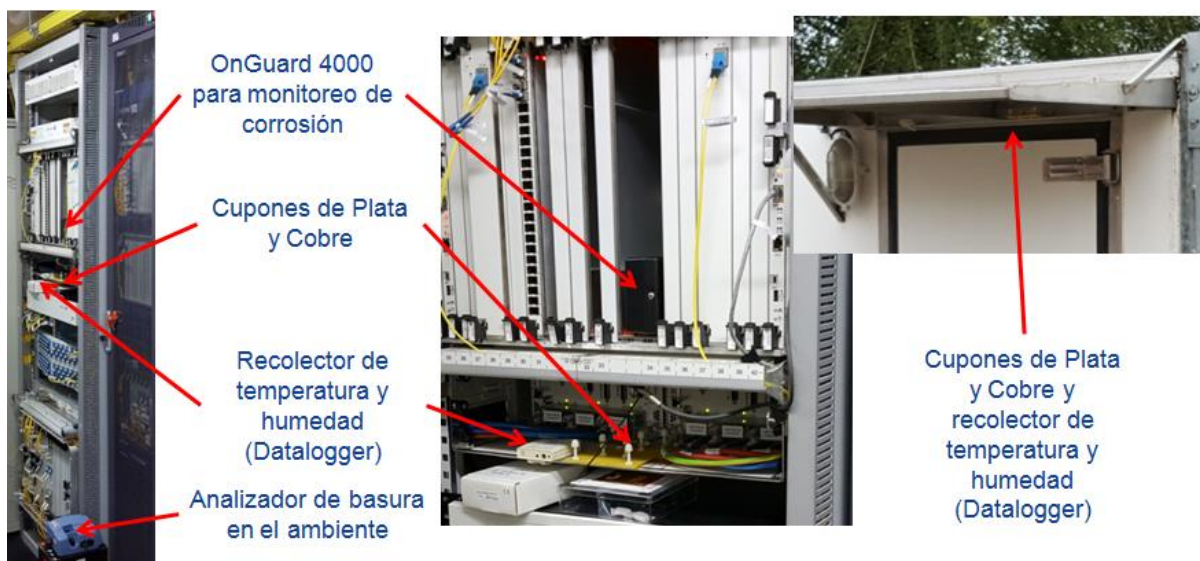


Figura 37: Inspección visual realizada por los alumnos.

## RESULTADOS PRELIMINARES

Objetivos: La inspección del sitio se lleva a cabo en el sitio de tipo Shelter A, en la localidad de S.A. de Areco para comprender la condición ambiental del sitio.

### Velocidad de corrosión medida con cupones de plata y cobre {Con equipo OnGuard 400):

Se determinó que la velocidad de corrosión de Ag es de 167 nm / mes, más de 8 veces la velocidad de corrosión de Ag permitida (20 nm / mes) para equipos electrónicos. La tasa de corrosión del Cu (30nm / mes) fue justo en el límite permitido (30nm / mes). El bache en la curva de corrosión tanto de Ag como de Cu se correlaciona con el salto de humedad relativa en el sitio como veremos en el siguiente apartado.

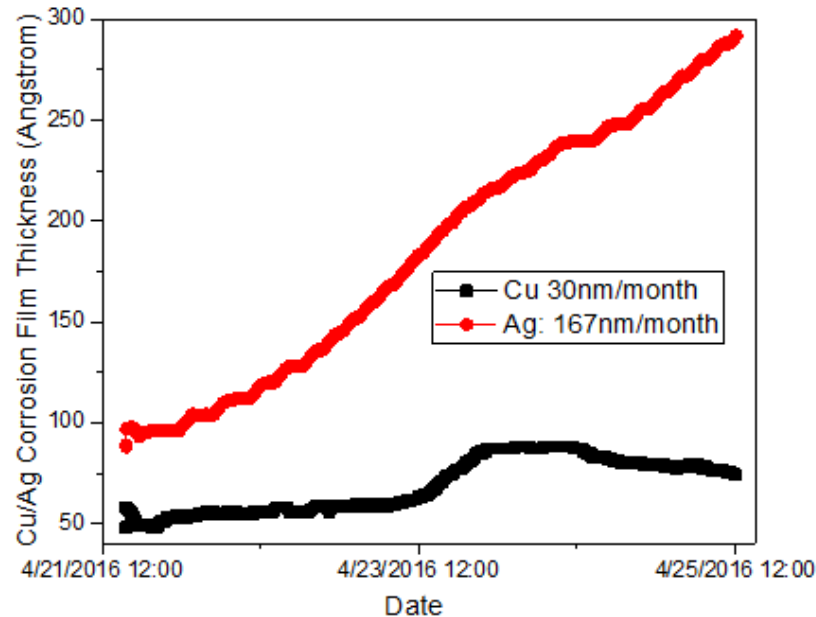


Figura 38: Nivel de corrosión para Cobre y Plata. Mediciones realizadas por los alumnos junto con el INTI.

Los datos comparativos de los resultados se establecen frente a las normas “iNEMI\* and ASHRAE Recommendation For Data Center and Telecomm Office”:

- 1) Una tasa de reactividad de cobre de menos de 30nm / mes
- 2) Una tasa de reactividad de plata de menos de 20 nm / mes

### MONITOREO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

La alta humedad relativa se observó entre el 23 y el 24 de Abril (Ver *Figura 39*), mientras que la temperatura estuvo siempre bajo control. En este caso pudimos correlacionar la alta humedad con situación de cambios atmosféricos y elevada humedad durante los días que se observan variaciones.

Esto nos permitirá luego sacar conclusiones entre la relación de la humedad del ambiente y la humedad dentro de los shelters tipo A.

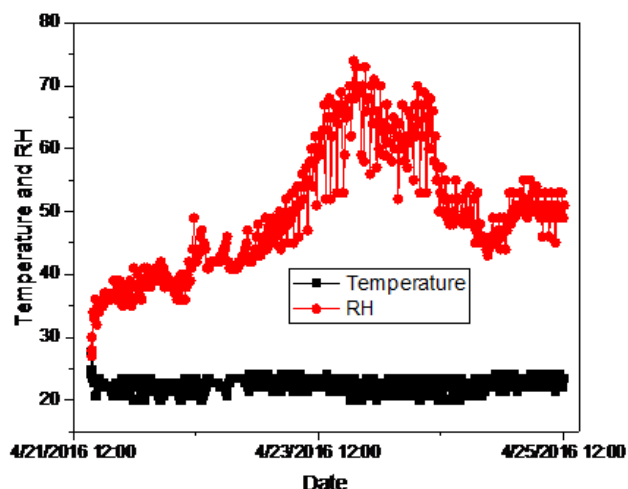


Figura 39: Humedad relativa en el sitio. Mediciones realizadas por los alumnos.

## MEDICIÓN DE POLVO EN AMBIENTE

El equipo *OnGuard 4000* permite realizar este tipo de mediciones y se observó un ambiente controlado con niveles de concentración estables. El pico observado se condice con una apertura de la puerta del shelter durante la medición por lo que se le considera muy puntual.

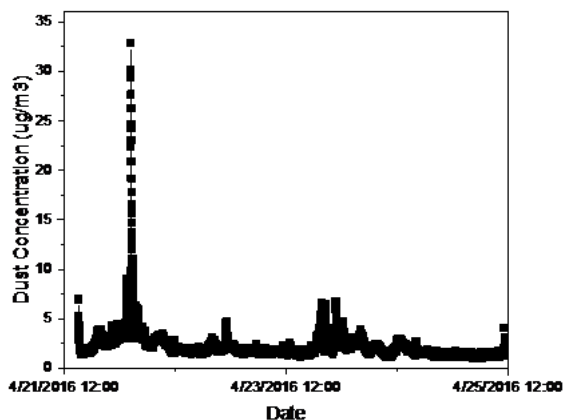


Figura 40: Polvo en el aire. Mediciones realizadas por el INTI.

## ON GUARD VS CUPONES

Después de solo 4 días de exposición, el cupón de plata (Ag) interior ya mostraba la apariencia típica de corrosión con azufre, mientras que el cupón Ag exterior permanecía brillante y no mostraba signos de corrosión, lo que indica que la fuente de  $H_2S$  probablemente sea interna del sitio ya que, como mencionamos anteriormente, los Shelters tipo A tienen

interacción mínima de aire con el medio exterior y el mismo es filtrado antes de ingresar.



Figura 41: Cupones de cobre y plata en el interior del sitio A (Izq.) y cupones luego de medición del exterior del sitio (Der.) Inspección visual realizada por los alumnos.

### ALFOMBRA VULCANIZADA

El análisis de la composición se realizó en ambos lados de la estera de caucho, con el lado superior mostrando ~ 1% de azufre y el lado inferior mostrando ~ 3% de azufre de forma consistente.



Figura 42: Imagen de la alfombra del sitio analizado. Captura realizada por los alumnos.

En las siguientes imágenes se observa claramente el detalle las mediciones sobre los compuestos presentes sobre la alfombra del sitio.

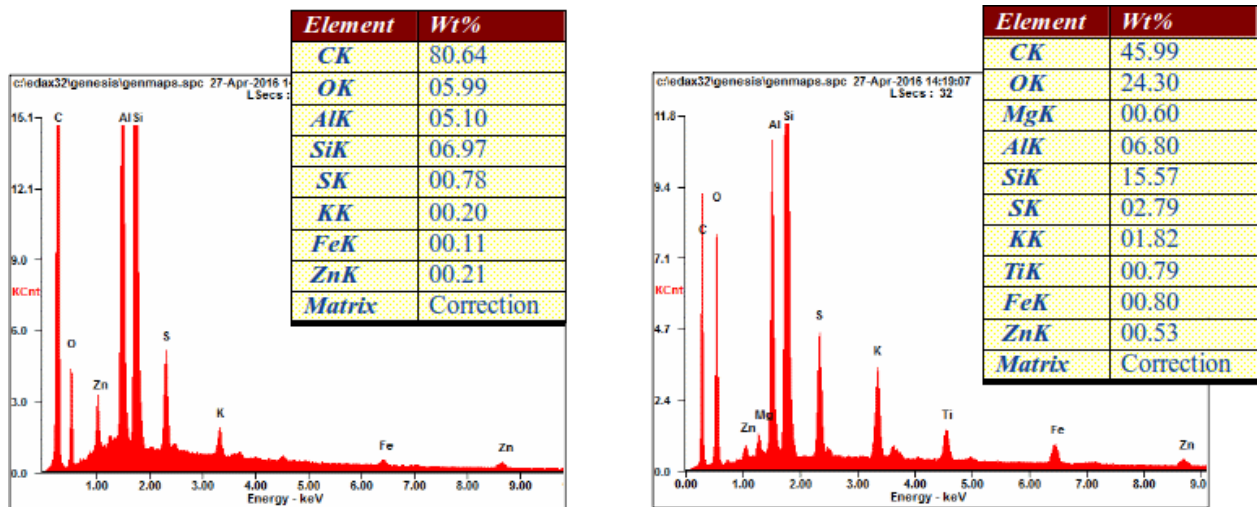


Figura 43(Izq.) cara “de arriba” de la alfombra y (Der.) cara “de abajo” - contra el piso. Mediciones realizadas por pedido de los alumnos a Bell-Labs como parte de la investigación.

### CUPONES DE COBRE Y PLATA BAJO ANÁLISIS

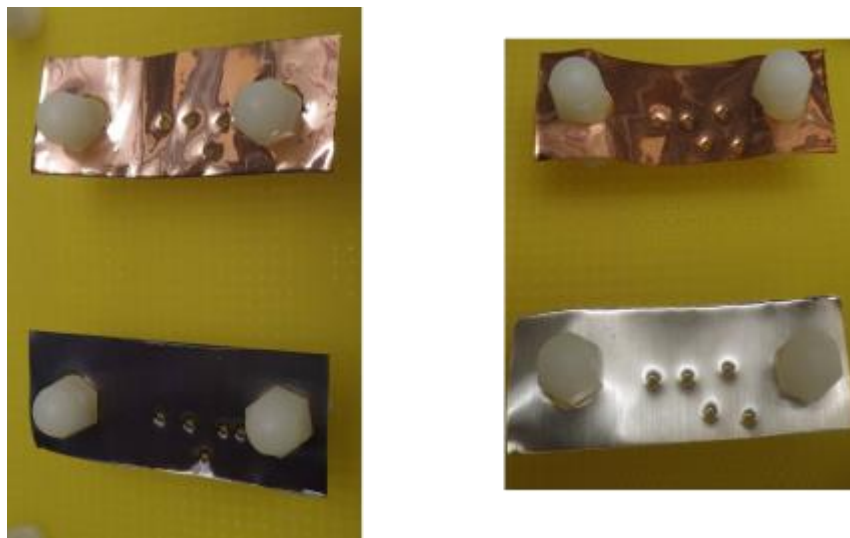


Figura 44. Interior del sitio (Izq.) - Exterior del sitio (Der.)

Después de 19 días de exposición, el cupón Ag interior mostró corrosión severa por azufre, mientras que el cupón Ag exterior permaneció brillante y no mostró signos de corrosión, lo que indica claramente que la fuente de  $H_2S$  es interna del sitio.

Tabla 3: Mediciones realizadas por pedido de los alumnos a Bell-Labs como parte de la investigación.

	Corrosion Rate (nm/month)	
Site	Ag	Cu
Indoor	255.8	42.8
Outdoor	147.6 due to dust	181.9 due to dust

La tasa de corrosión de Ag interior es más de 10 veces mayor que la velocidad de corrosión permitida para equipos electrónicos. El aumento de peso al aire libre se debe principalmente a la recolección de polvo.

### ANÁLISIS EDS SOBRE LAS MUESTRAS BAJO ESTUDIO

- La formación de  $Ag_2S$  se observó solo para interiores pero no para exteriores.
- Esta medición nos permite confirmar que el agente corrosivo se encuentra dentro del Shelter.
- En la imagen de arriba a la izquierda (*Tabla 3*) se observa principalmente formación de  $Ag_2S$ .
- En la imagen de abajo a la derecha se observa presencia de  $Ag_2S$ .
- En la imagen de abajo a la derecha, del exterior, solo se observa contaminación por polvo y suciedad del ambiente.

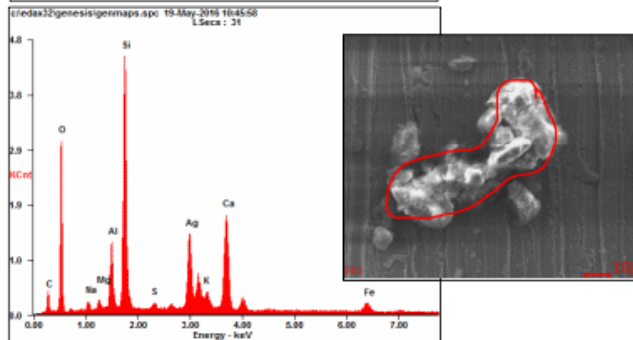
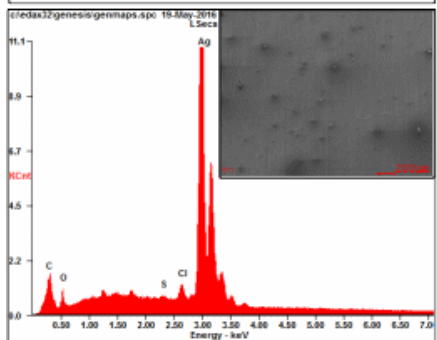
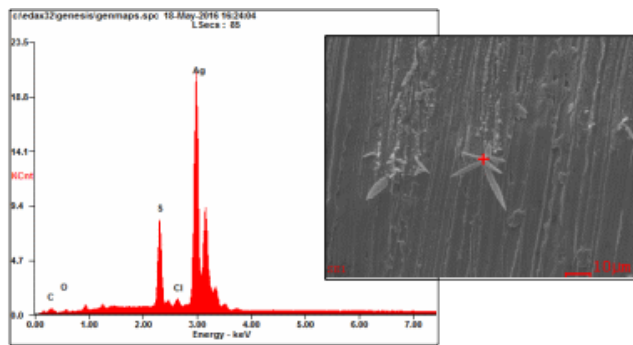
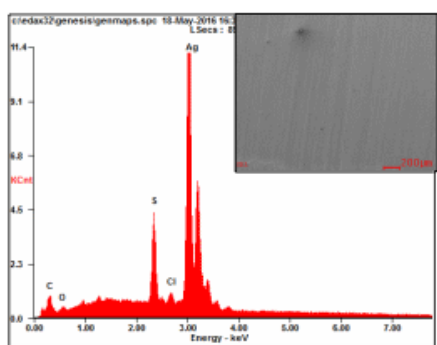


Figura 45: Comparación de las mediciones sobre los cupones.

(Arriba-Izq, cupón de cobre del interior del sitio. Arriba-Derecha, cupón de plata, interior  
 Abajo, Izq, cupón exterior de cobre; Abajo-Der., cupón exterior de plata)

### Monitoreo de la humedad relativa y comparativa con mediciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN):

La humedad relativa (RH) exterior muestra el ciclo diurno típico.

La humedad relativa interior no sigue el ciclo exterior, lo que indica un buen aislamiento del sitio del entorno exterior

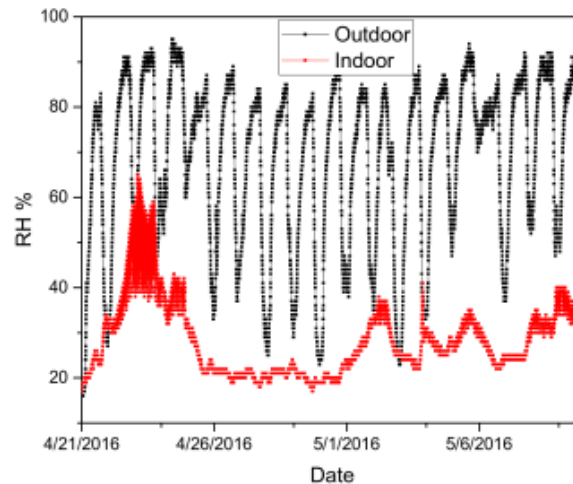


Figura 46: Medición de la evolución de la humedad relativa realizada por los alumnos.

### MONITOREO DE TEMPERATURA

La temperatura exterior muestra el ciclo diurno típico. La temperatura interior se mantuvo a 26 ° C del 21 de abril al 3 de mayo y saltó a 30 ° C el 3 de mayo por razones que no pudimos determinar.

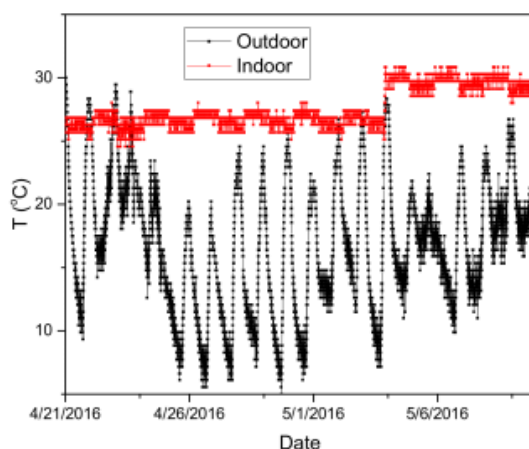


Figura 47: Medición de Temperatura realizada por los alumnos

Podemos determinar que se observó corrosión severa debido a compuestos reducidos de azufre en el sitio ARECO. La fuente de compuestos reducidos de azufre es interna al sitio y es probable que el caucho vulcanizado utilizado como alfombra en el sitio.

### 4.3 CASO DE ESTUDIO “VENDOR B” Y “OPERADOR X”

Al igual que en el caso del Vendor A la investigación inicial se debió a fallas de hardware en un sitio en particular, esta vez ubicado en la localidad de San Fabián, provincia de Santa Fe. Cabe mencionar que el Proveedor (Vendor) B ganó la licitación correspondiente al norte del País por lo tanto no compartía zona geográfica con el Proveedor A el cual se encuentra desplegado en otra zona.

Como se dijo anteriormente, lo que ambos Vendors tienen en común es el tipo de Shelter o sitio destinado a contener el equipo de telecomunicaciones. Estos sitios son contenedores específicamente diseñados para otorgar la operatividad a un equipo electrónico. Proven de energía, refugio físico, ambiente contenido y banco de baterías incorporado en caso de corte de electricidad.

Continuando con el caso relativo al *Vendor B* en el nodo San Fabián comenzaron a presentarse fallas sobre un determinado grupo de tarjetas o Circuit Packs como son comúnmente llamadas, las del tipo OTN<sup>26</sup>. A su vez poco tiempo después a ese sitio

<sup>26</sup> Las redes de transporte óptico (en inglés Optical Transport Network, OTN) son un conjunto de elementos de



comenzaron a sumarse nodos cercanos al mismo como Rosario o Santa Fe con fallas similares en las tarjetas antes mencionadas. Al igual que lo sucedido con el *Vendor A* estos sitios fueron los primeros en desplegarse dentro de una red de fibra óptica que comenzaba a expandirse desde cero. Absolutamente todo lo incorporado al sistema era nuevo y no había sido probado, llámese: Shelters, caminos de FO, bancos de baterías, cerco eléctrico del predio de cada sitio, operatividad del grupo operativo dedicado a controlar la funcionalidad de los sitios. Todo esto sumó complejidad a la hora de deducir cuál era el problema que estaba causando la falla repetida de hardware en esos sitios. Siguiendo con la lógica del *Vendor A* lo primero que se pensó fue en que algún desperfecto eléctrico estaba dañando el equipamiento, entonces se verificaron puestas a tierra (el Operador se hizo a cargo de las mediciones de puesta a tierra de todo el sitio utilizando un telurímetro<sup>27</sup>), se verificó que la salida de señal del rectificador de -48 VCC éste dentro del rango funcional, se verificó todas las conexiones eléctricas dentro y fuera del Shelter. No se encontraron desperfectos y se procedió al reemplazo de las placas en falla.

Luego de tres meses de haber hecho el recambio de placas en falla en los sitios nombrados anteriormente, el tamaño de la red había crecido y más nodos comenzaron a sumarse con problemas de hardware similares. Dado que la red ya comenzaba a estar operativa por segmentos, se continuó con la metodología de recambio de placas en falla, elevando el costo del proyecto por excesivos gastos en logística y repuestos. El problema principal era que aún se desconocía la causa que estaba generando tantas fallas en equipamiento, y esto afectaba tanto al Operador como al proveedor de tecnología.

Por contrato, las tarjetas en falla son enviadas al centro de reparación (EEUU) donde se les realiza un análisis para luego proceder a su reparación y ser devueltas a origen. Si el cliente lo solicita se puede pedir un análisis de la causa de la falla. Técnicos especializados insertan la placa en un chasis de prueba y le realizan un diagnóstico computacional. Lo que en muchos casos sucedía con las tarjetas del “Operador X” era que directamente el equipo no las reconocía, lo que resultaba imposible realizar un diagnóstico por software y directamente eran consideradas chatarra (*scrap*).

---

red ópticos conectados mediante fibra óptica capaces de proveer transporte, multiplexación, enrutado, gestión y supervisión de las señales ópticas.

<sup>27</sup> Los telurómetros o telurímetros son equipos que miden la resistencia de puesta a tierra y la resistividad por el método de Wenner.

Dado que resultaba imposible el análisis mediante software de las placas dañadas, especialistas en EEUU en noviembre del 2015 realizaron un análisis físico y un informe que dio como resultado que las fallas en los circuitos impresos fueron producidas debido a la corrosión que el ambiente había propiciado, específicamente se diagnosticó *creep corrosion*, en español corrosión por arrastramiento.

Como fue explicado anteriormente en el *Marco Teórico* el fenómeno de “*corrosión por arrastre*” es un proceso de deterioro del producto donde el azufre presente en el ambiente en conjunto con otros elementos forman moléculas como el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) compuestos altamente oxidantes que generan la migración del cobre sobre la plata, y finalmente cortocircuitos que arruinaran la funcionalidad de los circuitos impresos.

El informe también determinó lo siguiente:

- Un alto gradiente de temperatura, humedad, polvo y flujo de aire acelerar la reacción del cobre y la plata para formar las visibles dendritas.
- Antiguas generaciones de productos o equipamiento de otros *Vendors* utilizan plomo para realizar las soldaduras en la fabricación de los PCB, el plomo resulta inmune a este tipo de fenómeno.
- Para este caso de tarjetas el acabado superficial que se utiliza en la fabricación de los PCB es por inmersión en plata (ImAg). Este acabado se consideró como mejor opción al verse obligados por las directivas RoHS y WEEE a eliminar el plomo de su proceso de fabricación.
- Para mitigar el ataque de sulfuros a los PCB producidos por este Vendor, al proceso de ImAg se le añade una *pasivación orgánica*.
- Se recomienda registrar la locación específica de cada placa que fallo por esta condición.
- Información respecto a nivel de contaminantes atmosféricos, ubicación geográfica, presencia de alguna fábrica/ industria que libere azufre al ambiente como pueden ser plantas químicas, plantas de tratamiento de desechos, productoras de arcilla roja, zona agrícola, etc.
- Se recomienda analizar el gradiente de temperatura en los sitios donde se produjeron las fallas masivas, cambios bruscos de temperatura generan humedad por condensación, la humedad en conjunto con los químicos mencionados acelera el proceso de *creep corrosion*.

Una vez diagnosticado el problema lo siguiente fue demostrar el grado de agresividad

ambiental al que estaban expuestos los equipos, para esto y por recomendaciones brindadas por especialistas en Estados Unidos, se procedió a realizar una medición utilizando dos métodos diferentes, uno que mide parámetros en tiempo real, utilizando el instrumento *OnGuard* y otro método pasivo que consiste en dejar cupones de Plata y Cobre en el sitio a analizar para que luego de un tiempo determinado se quieren y se mande a analizar la cantidad corroída en cada elemento.

#### 4.4 RESULTADOS OBTENIDOS Y SU ANÁLISIS

##### RESULTADOS DE LA MEDICIÓN UTILIZANDO CUPONES

El sitio donde se realizó el estudio está ubicado en la localidad Rafaela, provincia de Santa Fe, la empresa a cargo de realizar el diagnóstico fue *Purafil*. Como se observa a la Tabla 4 los cupones fueron incorporados al Shelter el día 27/04/2016 y retirados el día 31/05/2016, totalizando 34 días de exposición.

El diagnóstico final para el ambiente fue clase G<sub>2</sub>, estandarizado bajo la norma ISA antes explicada. Se estimó una tasa de corrosión de 140A / 30 días sobre el cupón de Cobre y una de 966A/30 días para el cupón de Plata. Cabe destacar que no es buena noticia que el ambiente sea más agresivo sobre este último metal, dado que el método de acabado superficial más utilizado por el “Vendor B” es el de Inmersión en Plata.

Tabla 4: Resultado otorgado por *Purafil*

<b>Número de Pedido:</b>	1007333
<b>Nº de Panel de CCC:</b>	P97659
<b>CCC Coupon #:</b>	97659
<b>Fecha Instalación:</b>	27/04/2016
<b>Fecha Remoción:</b>	31/05/2016
<b>Días de exposición:</b>	34
<b>Nº de Panel de CCC P97659</b>	
<b>*ISA Class G2</b> Moderate	
<b>Corrosión sobre Cobre</b> 140 Å/30 Days	
<b>Corrosión sobre Plata</b> 966 Å/30 Days	

El resumen del análisis realizado por la empresa *Purafil* fue el siguiente:

El análisis de la reducción electrolítica sobre el *cupón* 97659 muestra la presencia de moderadas concentraciones de contaminantes en el medio ambiente bajo estudio. El Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S) se encuentra en un rango de 3 a 10 ppb, mientras que para el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) oscila entre 10 y 100 ppb. Los efectos de la corrosión son medibles y puede ser un factor determinante en la vida útil de los equipos electrónicos allí dispuestos.

Tabla 5: Proyección del material corroído a 30 días, a un año y a cinco años.

	<u>30 Days</u>	<u>1 Año</u>	<u>5 Año</u>
<b>Capa sobre Cobre</b>			
Cu <sub>2</sub> S	0 Å	0 Å	0 Å
Cu <sub>2</sub> O	82 Å	127 Å	166 Å
Desconocidos	58 Å	90 Å	118 Å
Totales	140 Å	217 Å	284 Å
<b>Capa sobre Plata</b>			
AgCl	0 Å	0 Å	0 Å
Ag <sub>2</sub> S	886 Å	10782 Å	53909 Å
Desconocidos	80 Å	968 Å	4842 Å
Totales	966 Å	11750 Å	58751 Å
<b>Corrosión por Poros en Oro:</b>			
Nota: 1000 Å = 0.1 micra			

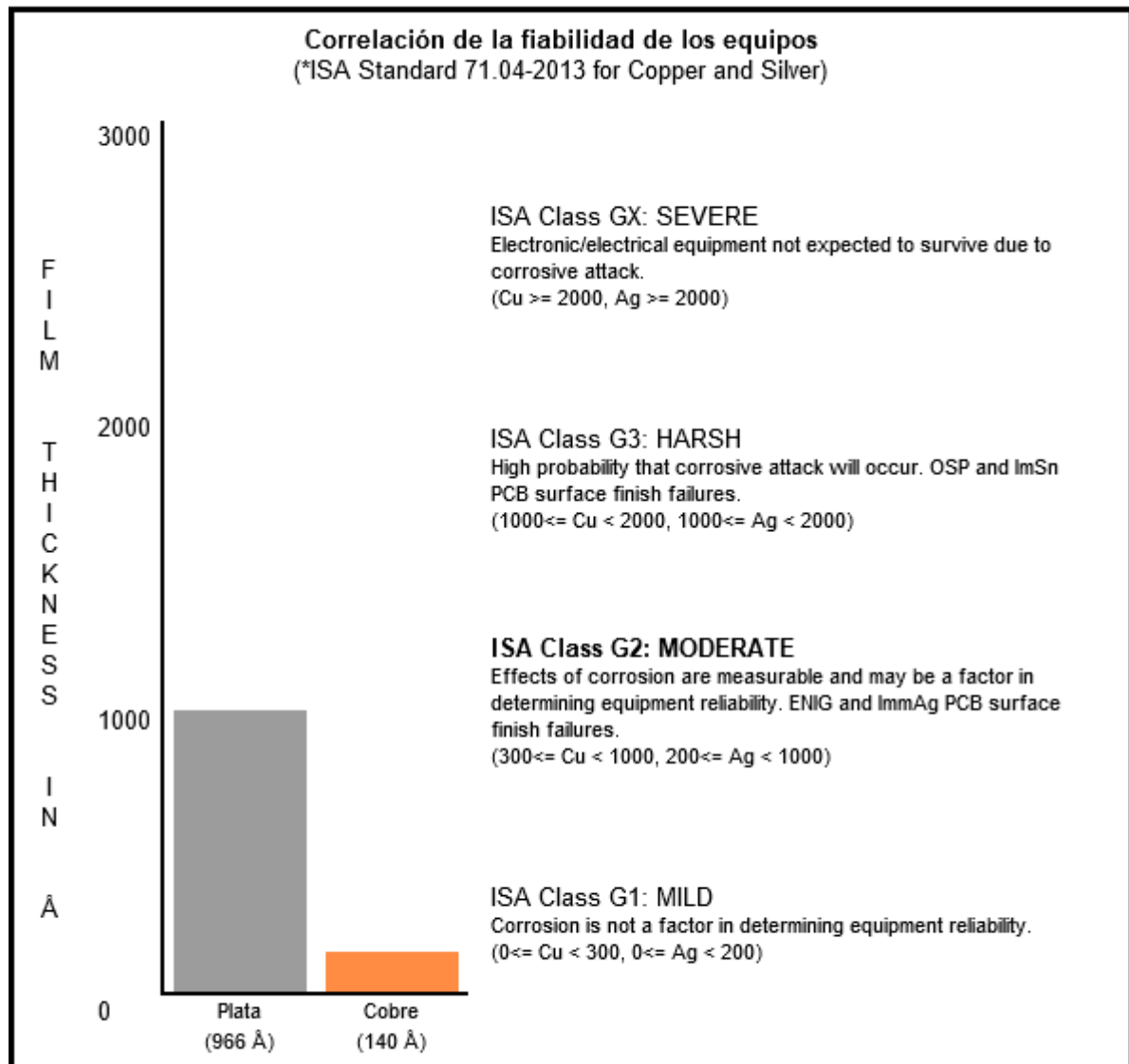


Figura 48: Cantidad de material corroído en angstrom tanto para el cupón de Cobre como para el de Plata. A su vez da la especificaciones que según la norma ISA debe cumplir cada elemento para clasificar un determinado ambiente. La norma dice que para determinar una clasificación de la severidad de la corrosión la utilización de ambos metales para el estudio.

### DISTRIBUCIÓN DE FALLAS POR SITIO

Durante un periodo de 32 meses se produjeron un total de 217 fallas en el equipamiento desplegado.

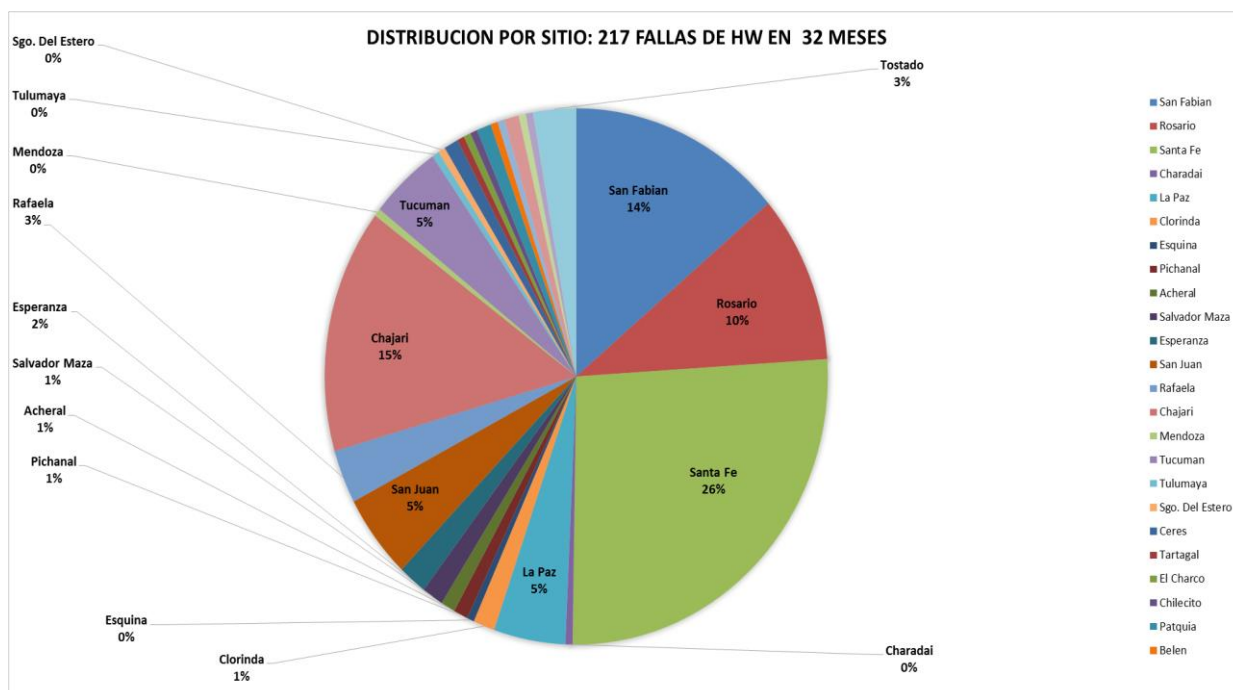


Figura 49: Distribución de falla por sitio realizada por los alumnos

Como se observa en el gráfico de torta de arriba, la mayoría de las fallas se produjeron en los sitios: Santa Fe, San Fabián y Rosario. Se destaca que justamente esos sitios fueron los primeros en instalar el equipamiento y ponerlos en marcha, siendo estos los que mayor tiempo estuvieron expuestos a un ambiente nocivo.

### POSIBLE CAUSA DE FALLA POR OBSERVACIÓN DIRECTA

Basado en nuestros conocimientos producto de la investigación realizada y trabajo en campo se observa que todas las placas (*circuit packs*) producidas por el *Vendor B* no parecen tener los mismos parámetros constructivos. Se realizó una inspección visual con lupa de diferentes PCBs, con la salvedad de que todas las analizadas fueron producidas por el mismo Vendor y son funcionales a un mismo tipo de equipamiento (equipo de transmisión por fibra óptica DWDM).

En la Figura 50:

- Se observa agujeros through-hole destapados.
- Se observa en los círculos negros sobre el PCB, como es que tal vez la corrosión por arrastre entró por los trough-hole descubiertos, y se expandió. Se suponen que las capas intermedias del PCB fueron invadidas con humedad y agentes contaminantes induciendo el proceso de creep corrosión.

- La tarjeta fue considerada para enviar a chatarra (Scrap).

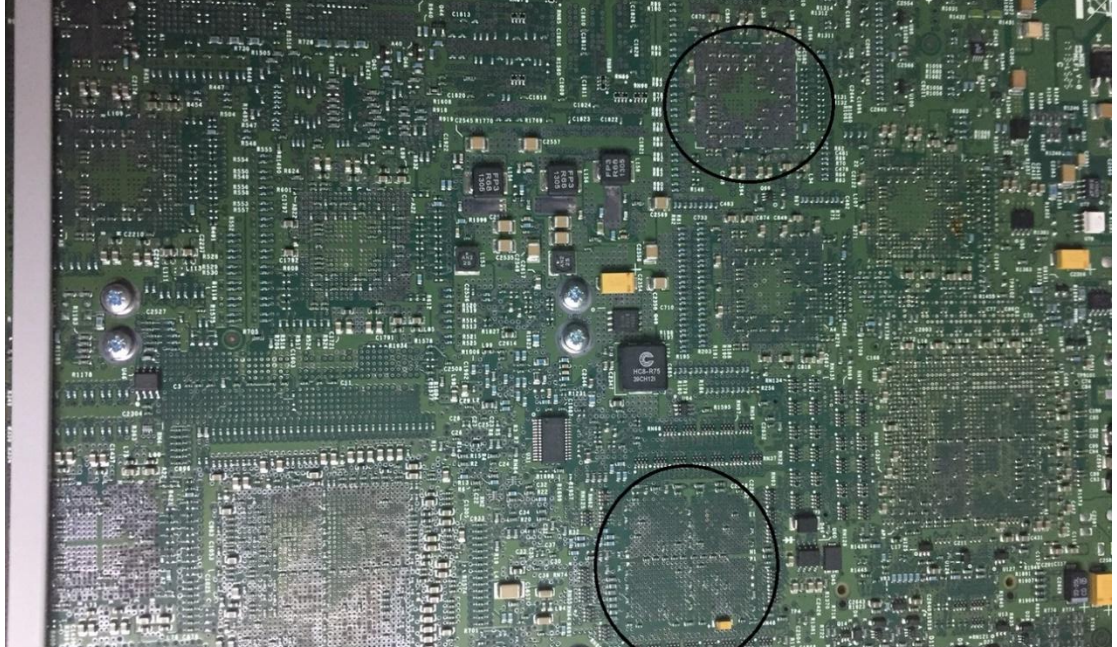


Figura 50: Observación realizada por los alumnos

En la Figura 51:

- Parece tener en su placa madre con un proceso de fabricación diferente y con todos los *trough-hole* tapados, (los usados y los no usados cubiertos por soldadura y por ende por barniz)
- La placa hija no tiene los agujeros tapados y siendo que estuvieron en el mismo ambiente, se ve como parte de la misma placa hija se ha destruido, es muy notorio frente a la placa madre que parece estar en buenas condiciones.

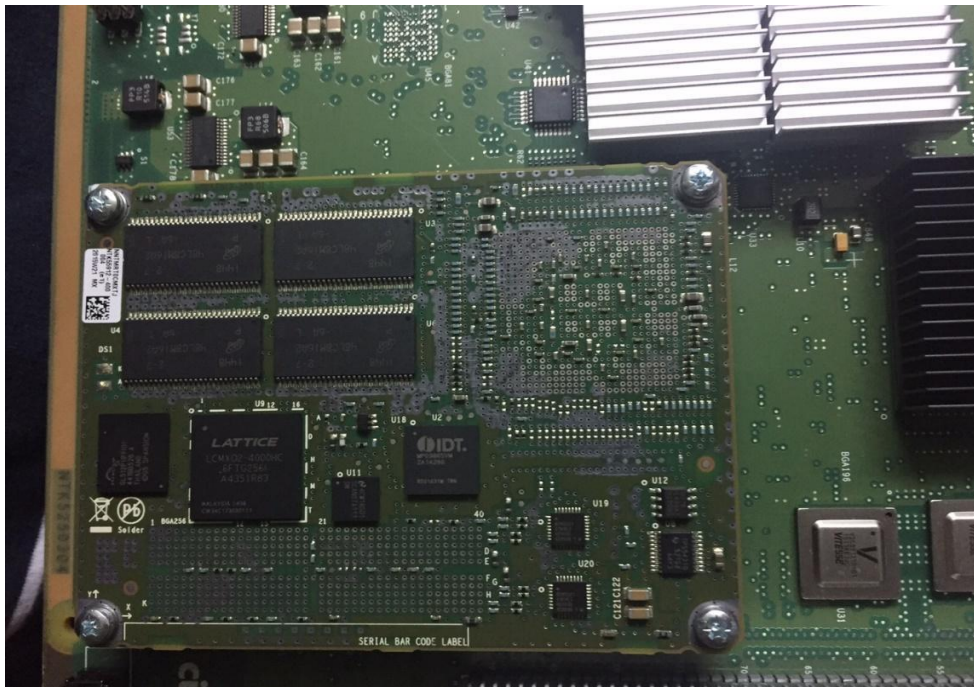


Figura 51: Inspección realizada por los alumnos.

En la Figura 52:

- En la placa madre se utiliza una aleación con oro, posiblemente un acabado superficial del tipo **ENEG** (*Electrolytic Nickel/Electrolytic Gold*).
- La superficie del PCB se la ve en buenas condiciones, incluso se ve los *trough-hole* destapados. Se puede observar bajo lupa que no parece haber síntomas de corrosión en la misma a pesar que estuvo expuesta a las mismas condiciones que la tarjeta anterior.



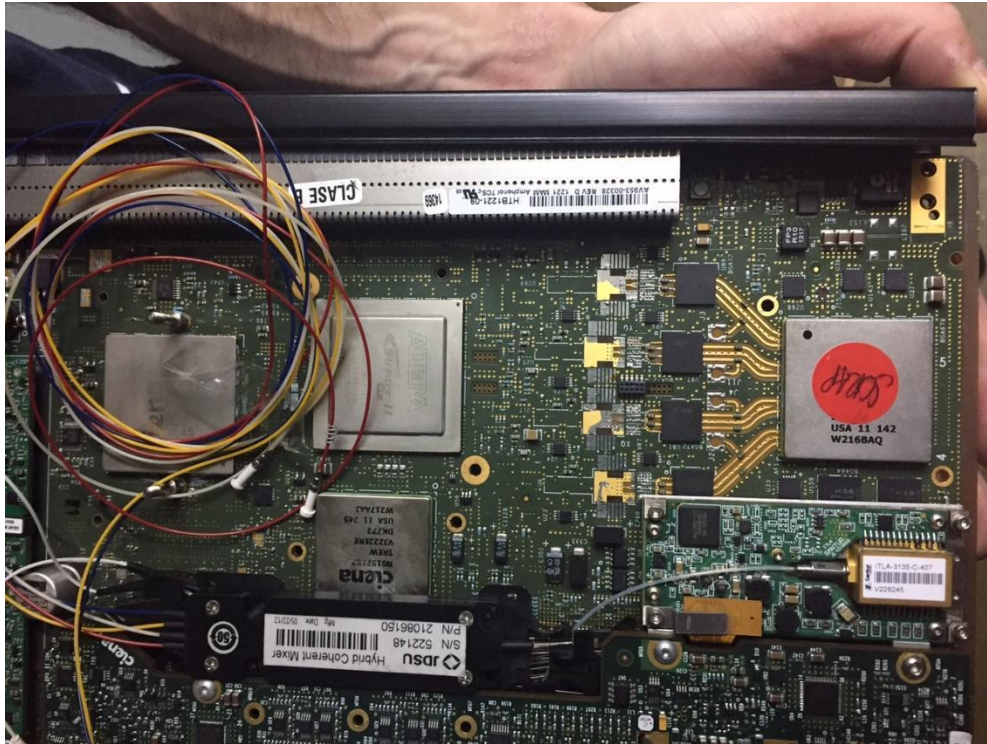


Figura 52: Inspección realizada por los alumnos.

En la Figura 53:

- Esta es una placa en donde no parece haber aleaciones de oro utilizadas, sin embargo y dado a que se realizó un proceso de recubrimiento de *through-hole* con lo que suponemos es máscara anisoldante y a su vez se realizó un barnizado a la tarjeta, podemos dilucidar que el ataque corrosivo es mucho menos intenso que en los casos de las Figuras 50 y 51.

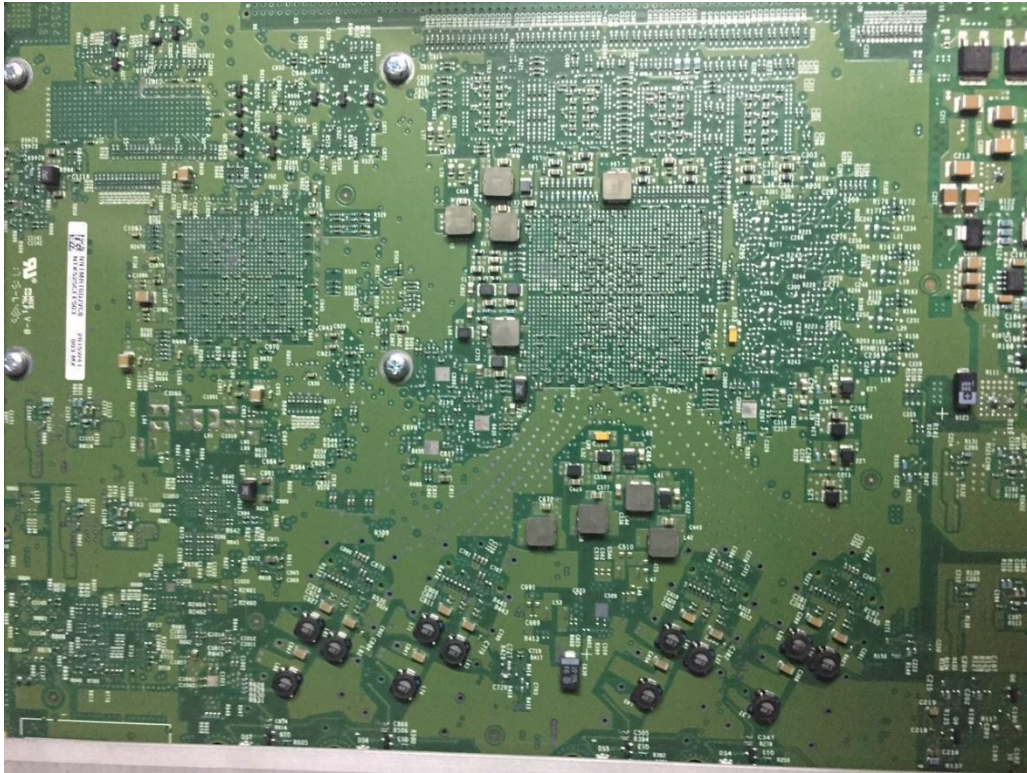


Figura 53: Inspección realizada por los alumnos

Los resultados observados nos dicen que con el proceso antiguo y comúnmente utilizado antes de que salieran las normas ambientales, el método HASL (*Hot Air Solder Leveling*) donde el material soldante era una aleación de estaño plomo, o con el método que utiliza Oro ENIG - (Electroless Nickel Immersion Gold), el fabricante no se preocupaba por tapar los *trough-hole* no usados y estos quedan destapados, ahorrando dinero en material y facilitando el re uso de las tarjetas.

Cuando cambiaron el proceso de fabricación al de ImAg el fabricante continuó no rellenando los *trough-hole* de prueba y medición. Dado que la Inmersión en Plata como acabado superficial es mucho más susceptible a la corrosión que los métodos HASL y ENIG el recubrimiento utilizado para sellar la plata expuesta en los *trough-hole* no alcanzó a cubrir con plenitud toda la superficie de los mismos, produciéndose en contacto con la humedad y agentes contaminantes, el fenómeno de *creep corrosion* en las distintas capas formantes de los PCB.

## ESPECIFICACIONES DE LOS SITIOS

Como se mencionó previamente el equipamiento electrónico de telecomunicaciones,

tanto del “Vendor A” como del “Vendor B” tenían en común el tipo de *Shelter* donde estaban instalados. Este tipo estandarizado de Shelter tenía las características de diseño que serán explicadas a continuación.

## DIMENSIONES DEL SHELTER

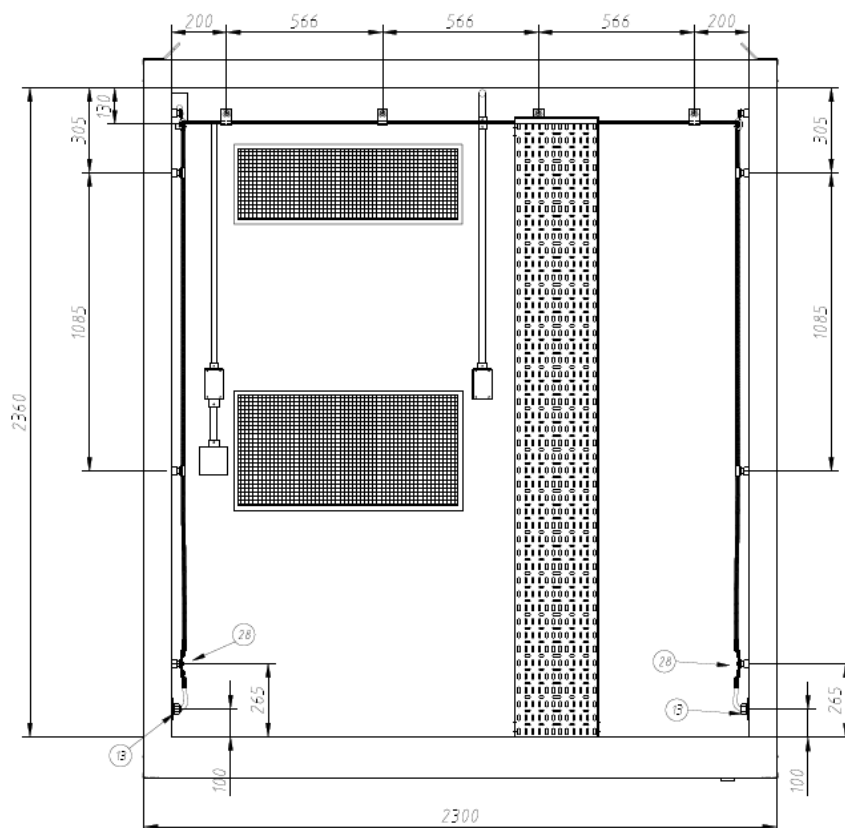


Figura 54: Plano del Shelter

En la imagen de arriba podemos observar un corte transversal de la estructura. Las dimensiones correspondientes son 2,36m de alto, 2,3m de profundidad y 6m de largo.

## VENTILACIÓN

El interior del shelter se encuentra confinado, solamente se facilita la ventilación mediante el sistema de aire acondicionado. Cabe destacar que ante un corte de energía el banco de baterías solo estaba destinado a alimentar eléctricamente a los equipo de telecomunicaciones, si el corte de energía se hace prolongado, en el interior del shelter se genera un aumento considerable de la temperatura ya que no existe ningún sistema de ventilación auxiliar.

## SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

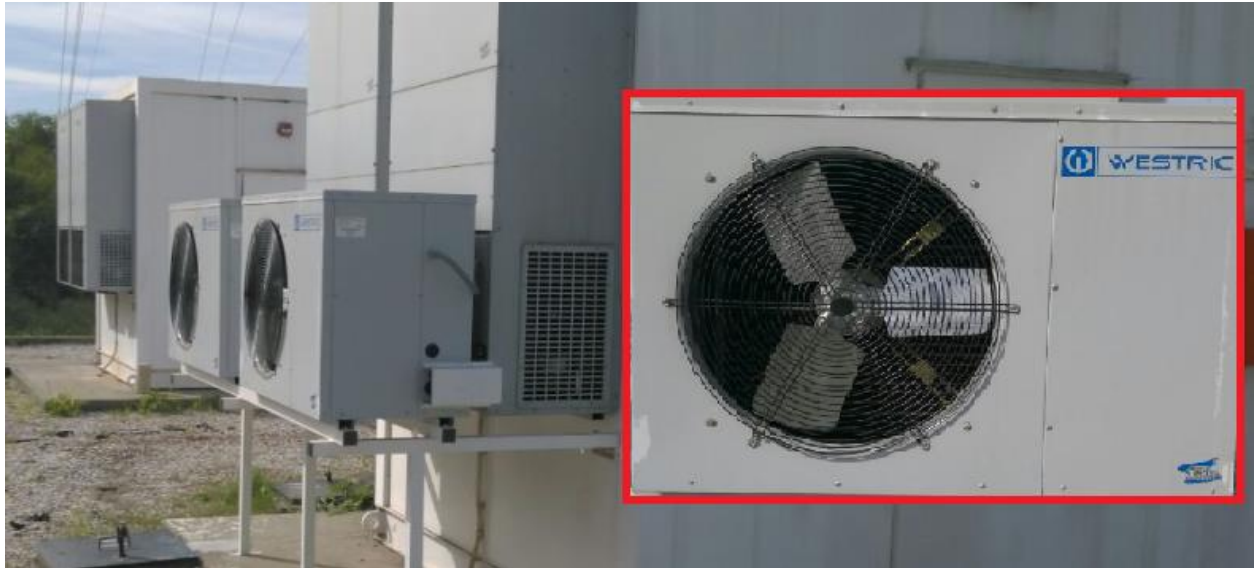


Figura 55: Inspección realizada por los alumnos.

El Shelter dispone de un sistema de aire acondicionado redundante. Configurado para trabajar un determinado periodo de tiempo cada uno y de forma separada. Como se mencionó anteriormente la alimentación eléctrica no se encuentra protegida y ante un corte de energía externa estos dejan de funcionar.

Dada nuestra experiencia en campo, se observó que la temperatura interna estaba configurada en 19 grados Celsius. En los días de mucho calor al abrir la puerta de ingreso se producía una condensación de agua sobre las paredes internas del Shelter, creando un ambiente propicio para la corrosión.

## BATERÍAS



Figura 56: Inspección realizada por los alumnos.

El sitio dispone de un banco de baterías interno, destinado a proveer de energía a los equipo de telecomunicaciones ante un caso de corte de suministro externo. No existe una aislación entre el banco de baterías y el equipamiento electrónico.

Las baterías por especificación deben trabajar bajo una temperatura ambiente controlada de 25 grados Celsius. Como se mencionó en puntos anteriores, el sistema de aire acondicionado deja de funcionar si se produce un corte eléctrico externo, incrementándose la temperatura interna del shelter muy por encima de 25 grados.

En ciertas ocasiones se observó pérdida de ácido en los electrodos de las baterías. Como es comúnmente sabido uno de los principales compuestos internos de una batería es Ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), compuesto altamente corrosivo.

### **ESTADO INTERNO DEL SHELTER**

En los sitios donde se observó la mayor tasa de fallas en equipamiento, se pudo notar visiblemente que la corrosión no solo afectaba a la electrónica, sino a toda la estructura interna del Shelter, como por ejemplo bandejas superiores galvanizadas, tuercas, tornillos, y platina de masa donde se conecta la descarga a tierra de los equipos.

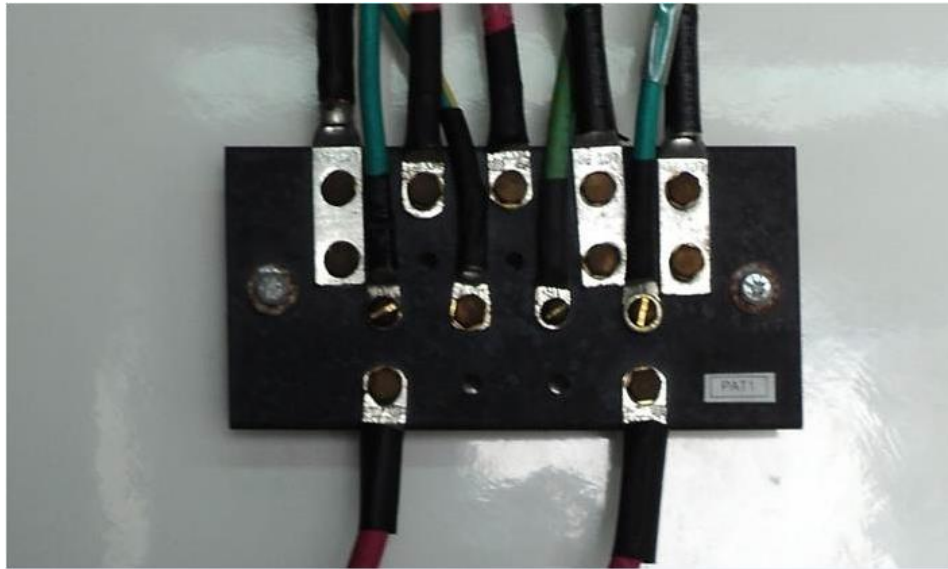

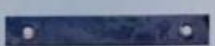


Figura 57: Inspección realizada por los alumnos.

En la Figura 57 se observa una placa de cobre que hace las veces de descarga a tierra física de los equipos electrónicos. Como se puede observar el color de la misma es oscuro y debería ser rojizo.

Tabla 6: Estándar según norma ISA para determinar tipos de ambientes corrosivos. (Norma ISA S71 04-1985)

ISA STANDARD S71.04-1985			
CLASS	REACTIVITY RATE	AIR QUALITY CLASSIFICATION	PURAFIL COUPONS
G1	<300 Å/30 DAYS	MILD- Corrosion is not a factor	
G2	<1000 Å/30 DAYS	MODERATE- Corrosion is measurable	
G3	<2000 Å/30 DAYS	HARSH- High probability that corrosion attacks will occur	
GX	≥2000 Å/30 DAYS	SEVERE- electronic/electrical equipment is not expected to survive	

Si comparamos la *platina de tierra* en la Figura 50. Con el cupón de cobre G<sub>x</sub> de la Tabla VI podemos dilucidar que según el Standard ISA antes explicado, y haciendo una mera comparación visual, se puede considerar al ambiente dentro del shelter como severamente corrosivo.

## **PRUEBAS DE CONTRIBUCION A GENERACION DE *CREEP CORROSION***

En esta sección describiremos las acciones que se iniciaron una vez observadas y contrastadas las mediciones entre los Vendors A y B por parte del Operador X.

Como primera gran medida previa a comenzar con un plan definitivo de corrección de entorno para los Shelters antes descritos, se definió evaluar y concluir acerca de la influencia y potencial degradación que producía, a lo largo del tiempo, cada uno de los factores analizados a lo largo de este informe.

Se acordó que sólo se analizarían por última vez cada uno de los parámetros y cómo estos interactúan unos con otros y en conjunto. El objetivo final de esta última medición fue el de dimensionar los costos de adecuación y las prioridades a la hora de modificar los Shelters más allá de que, por cuestiones preventivas y ya analizadas, el operador dispuso quitar todas las alfombras de los sitios con mayor tasa de falla ya que consideramos a las mismas como el principal generador de elementos nocivos (Azufre) para los equipos electrónicos.






Es importante aclarar que las mediciones se realizaron todas en el mismo tipo de sitio. Administrando un total de 5 Shelters uno al lado del otro para asegurar que las condiciones exteriores fuesen las mismas en todos los casos.

Los diferentes tipos de Shelters que se configuraron fueron los siguientes:

- Shelter 1: Configurado sin banco de baterías en su interior ni alfombra de goma.
- Shelter 2: Configurado con banco de batería en su interior pero sin alfombra de goma.
- Shelter 3: Sin banco de baterías y sí con alfombra de goma.
- Shelter 4: Con banco de baterías, alfombra de goma y prueba de nuevo sistema de ventilación alternada para recambio de aire con el exterior.
- Shelter 5: Con banco de baterías y alfombra de goma pero sin sistema de ventilación y recambio de aire con el exterior.

Luego de configurar el esquema descrito arriba con 5 Shelters en paralelo se procedió a realizar una medición de campo de dos semanas y, como podrán ver en la Tabla 7 con solo realizar una inspección visual de los cupones pudimos determinar el orden de peso y agresividad de cada una de las variables del sitio (Baterías, alfombra, ventilación) para con los equipos electrónicos allí instalados.

Tabla 7: Comparativa de todas las variantes de mediciones.

	Shelter 1	2	3	5	4
Externo	-Sin batería -Sin piso	-CON batería -Sin piso	- Sin batería - CON piso	- CON batería - CON piso - CON ventilación	- CON batería - CON piso - Sin ventilación
					

Como se puede observar claramente y extraer conclusiones de la inspección visual de los cupones instalados, podemos dilucidar que, en grado ascendente de izquierda a derecha, tanto la alfombra de goma como el banco de baterías son los factores que más influyen y contribuyen al desarrollo de *creep corrosion*. Si se debiera dar un orden, el piso (la alfombra de goma) es el que contribuye en primer término a catalizar el proceso de corrosión y, el banco de baterías, el que contribuye en segundo lugar.

Es claro también que la ventilación colabora a disminuir la *creep corrosion* pero no es un factor determinante.

### INFORMACIÓN Y DETALLE TÉCNICO DE LAS MEDICIONES REALIZADAS

Determinaciones requeridas: Medición de la velocidad de corrosión de los cupones y análisis de los productos superficiales.

Tiempo de realización de las pruebas: 17 días corridos.

Metodología empleada: Observación de las muestras presentadas para extraer primeras conclusiones por inspección visual para luego realizar inspección con microscopio electrónico y análisis superficial de microonda dispersiva de energía EDAX. Finalmente realizar una reducción coulombimétrica de películas superficiales de los cupones.

### RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Los cupones de Plata analizados presentan corrosión generalizada. Los cupones de cobre, en contraposición, presentan manchas oscuras en diferentes zonas de su superficie.



Luego del análisis químico realizado (EDAX) se confirmó la presencia de azufre y cloro en la superficie de las láminas de metal analizadas.

Los elementos presentes dentro de los shelters generan un ambiente corrosivo para los componentes metálicos.

Además de la presencia de azufre y cloro se destaca a la temperatura y la humedad relativa en el ambiente como factores clave en la velocidad de corrosión de los elementos metálicos de las placas. Para el caso de la presente prueba los valores de temperatura y humedad están dentro de rangos aceptables.

Tabla 8: Resultados de velocidad de corrosión en cupón de plata ordenados de forma ascendente.

Shelter 1	Shelter 2	Shelter 3	Shelter 4	Shelter 5
Sin baterías	Con baterías	Sin baterías	Con baterías	Con baterías
Sin alfombra	Sin alfombra	Con alfombra	Con alfombra	Con alfombra
Sin ventilación	Sin ventilación	Sin ventilación	Con ventilación	Sin Ventilación
<b>Velocidad de Corrosión (Angstrom)</b>				
26,51	40,57	69,48	129,04	141,92

Al evaluar los resultados obtenidos de velocidad de corrosión de la plata en función de las distintas variables de estudio - el banco de baterías, alfombra y ventilación- se puede concluir que el shelter 5 es el que posee el ambiente más agresivo, sin ventilación.

#### **4.5 MEJORAS PROPUESTAS EN LOS SHELTERS.**

Dada la alta tasa de falla en equipamiento y luego de los resultados obtenidos producto del trabajo de investigación y pruebas en campo llevado adelante en conjunto, (especialistas de ambos proveedores, Operador y entidades especializadas en el tema) se llevó a cabo un plan de acción cuyo objetivo fue mejorar el entorno donde el equipamiento residía.

Se dictaron las siguientes recomendaciones:

- Eliminación de la alfombra de caucho vulcanizado.
- Instalación de deshumidificadores en los shelters.
- Sistema de ventilación a través de los aires acondicionados en caso de corte de energía.
- Reemplazo de banco de baterías dañado (en los sitios donde se encontró pérdida de ácido en los electrodos).
- Reconfiguración del ciclo automático de carga/descarga del banco de baterías cada un periodo de 6 meses.
- Reconfiguración del sistema de regulación de temperatura para que opere de 20 a 24 grados Celsius. Esto evita cambios bruscos de temperatura al abrir la puerta del sitio, evitando la condensación del agua.

#### **4.6 RESULTADOS LUEGO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS**

Luego de que las modificaciones mencionadas en la sección anterior se llevarán a cabo, el “Operador B” realizó una medición de temperatura, humedad y tasa de corrosión en el sitio “San Fabián” ubicado en la provincia de Santa Fe. Se utilizó el instrumento On Guard.

El instrumento se instaló en el sitio bajo análisis el día 12/06/2016 a las 8:38 am. Se configuró un intervalo de captura de 60 min.

El mismo fue retirado el día 06/07/2016, sumando un total de 24 días de estudio.

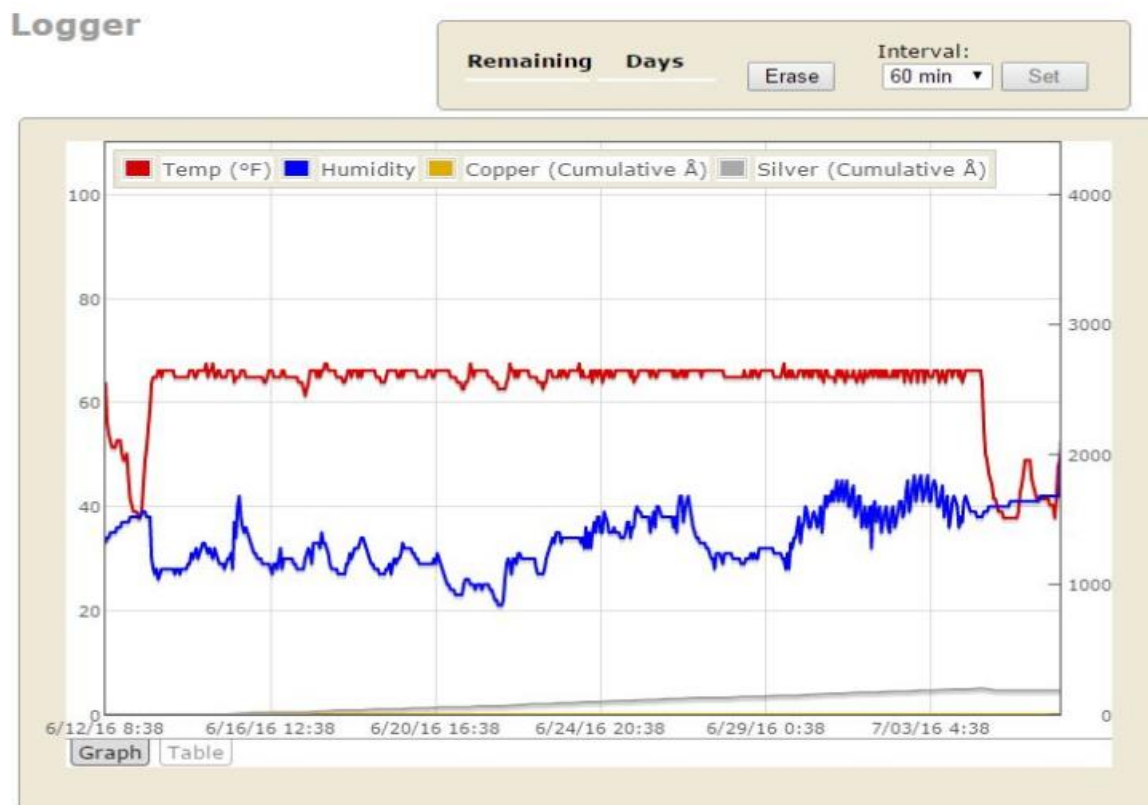
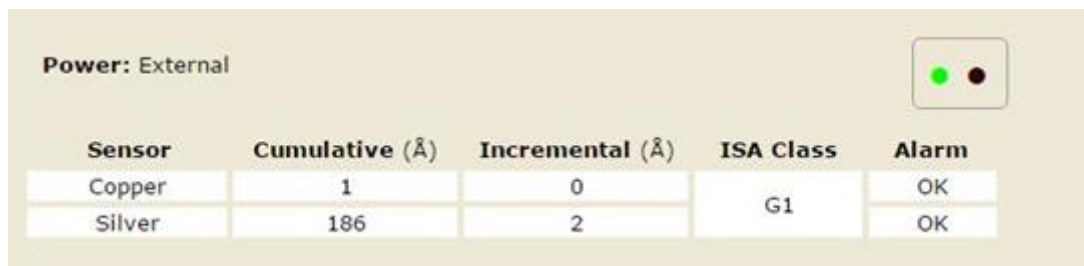


Figura 58: Evolución de temperatura, humedad y corrosión en el tiempo. Realizado por la investigación de los alumnos.

Como podemos observar en las curvas de la Figura 58 se muestra la temperatura, humedad, nivel de corrosión para el cupón de cobre y nivel de corrosión para el cupón de plata, y su evolución en el tiempo durante el periodo de prueba.

- La curva en rojo, muestra una temperatura estable que promedia los 68 grados Fahrenheit (20 grados C).
- La curva en azul muestra la humedad ambiente, que si bien no es regular y estable como la curva de temperatura, nunca sobrepasó el 46%.
- El total acumulado de corrosión en Angstrom para el cupón de cobre fue de 1.
- El total acumulado de corrosión en Angstrom para el cupón de plata fue de 186.

Tabla 9: Mediciones utilizando *On Guard4000*. Resultados Obtenidos



Sensor	Cumulative (Å)	Incremental (Å)	ISA Class	Alarm
Copper	1	0	G1	OK
Silver	186	2		OK

Los niveles de corrosión según la norma ISA, califica al ambiente estudiado como G1. Es considerado óptimo para la instalación de equipos de telecomunicaciones.

## 5. CONCLUSIONES

En relación a las hipótesis planteadas en esta investigación, se puede concluir lo siguiente:

- Las fallas en el equipamiento no estaban relacionadas con la conectividad eléctrica ni el montaje de los chasis.
- Las fallas generalizadas en el equipamiento no estaba relacionada a un mal lote de tarjetas entregadas al operador.
- Si en el sitio en donde está instalado el equipamiento electrónico se detecta azufre (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>), un alto gradiente de temperatura, y humedad relativa por encima del 50%, podemos concluir que es un ambiente propicio a la generación de corrosión sobre el equipamiento, y que fue el causante de las fallas generalizadas sobre el hardware de la red del Operador.
- El proceso de fabricación de los proveedores de tecnología tuvo implicancia directa sobre el ataque corrosivo y posterior falla en el equipamiento electrónico, producto de la utilización del acabado superficial ImAg en los PCBs y su susceptibilidad a *la creep Corrosion*.

En función de los resultados de esta investigación, se pueden formular las siguientes recomendaciones para los proveedores, operadores y entidades especializadas que cuentan con hardware instalado en ambientes agresivos:



- Eliminación de alfombras de caucho vulcanizado.
- Instalación de deshumidificadores en los shelters.
- Instalación de sistemas de ventilación a través de aires acondicionados en caso de corte de energía.
- Vigilancia y reemplazo de bancos de baterías plomo ácido / gel dañadas.
- Reconfiguración del ciclo automático de carga/descarga del banco de baterías cada 6 meses.
- Reconfiguración del sistema de regulación de temperatura para que opere de 20 a 24 grados Celsius, para evitar cambios bruscos de temperatura al abrir la puerta del sitio, evitando la condensación del agua.

## BIBLIOGRAFÍA

*"RoHS Solved One Problem, Created Others - Reliability Reports from the Field.* **Crosley, G. Hua, F., Lembach, K., and Muller. 2009.** San Diego, CA : s.n., 2009.

**Abbott, W. 1988.** *The Development and Performance Characteristics of Mixed Flowing Gas Test Environment.* 1988.

**American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2009.** *Particulate and Gaseous Contamination Guidelines for Data Centers.* Atlanta : s.n., 2009.

**Certification., China.** <http://www.china-certification.com/en/what-is-ccc>. [En línea]

**Cherie Chen, J. C.** The Surface Finish Effect on the Creep Corrosion in PCB.  
<http://www.smtnet.com/library/files/upload/creep-corrosion.pdf>. [En línea]

**Clyde F. Coombs, J. 2008.** Printed Circuits Handbook. s.l. : McGraw-Hill's., 2008.

**COSASCO.** <https://www.cosasco.com/metal-loss-coupons-corrosion-monitoring.html>. [En línea]

Definition, RoHS Compliance. <http://www.rohscompliancedefinition.com/china-rohs>. [En línea]

**Fu, H.** Testing Printed Circuit Boards for Creep Corrosion in Flowers of Sulfur Chamber. [En línea] <https://pdfs.semanticscholar.org/81ca/dbbc7a6416797890e99af0cb6b170a15fd8d.pdf>.

<http://catarina.udlap.mx/>. [En línea]

**2011.**

<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:EN:PDF>. [En línea] 2011.

**ISA-71.04-1985, Standard. 1985.** *Environmental Conditions for Process Measurement and Control.* 1985.

**JEIDA-29-1990, Standard:. 1990..** *Standard for Operating Conditions of Industrial Computer Control System.* Tokyo : s.n., 1990.

**Mazurkiewicz, P. 2016.** *Accelerated Corrosion of Printed Circuit Boards due to High Levels of Reduced Sulfur Gasses in Industrial Environments.* In: *Proceedings of the 32nd International Symposium for Testing and Failure Analysis.* 2016.

**Mitzner, K. 2009.** *Complete PCB Desing Using OrCad and PCB editor.* Burlington, MA 01803 : s.n., 2009.

**MSC.** <http://www.themcsgroup.co.uk/gallery-category/electronics-telecoms/>. [En línea]

**Muller, C.O. 2007.** *Combination Corrosion Coupon Testing Needed for Today's Control Equipment.* 2007.

**Rodríguez, J. A. 2017.** <http://www.cursos.maximatec.com>. [En línea] 2017.

**Schueller, P. S.** Creep corrosion of electronic assemblies in harsh environments. [En línea]  
<https://www.dfrsolutions.com/hubfs/Resources/Creep-corrosion-of-electronic-assemblies-in-harsh-environments.pdf>.

**Schueller, Randy. 2007.** CREEP CORROSION ON LEAD-FREE PRINTED CIRCUIT BOARDS IN HIGH. [http://www.ok1mjo.com/all/ostatni/RoHS/problematika\\_RoHS\\_a\\_HAM\\_zarizeni-creep\\_corrosion.pdf](http://www.ok1mjo.com/all/ostatni/RoHS/problematika_RoHS_a_HAM_zarizeni-creep_corrosion.pdf). [En línea] 2007.

**1987-07.** *Standard: IEC 60654-4 Operating Conditions for Industrial-Process Measurement and Control.* 1987-07.

**Veale, Robert. 2005.** RELIABILITY OF PCB ALTERNATE SURFACE FINISHES IN A HARSH INDUSTRIAL ENVIRONMENT. [En línea] 25 de 9 de 2005.  
[https://www.smta.org/knowledge/proceedings\\_abstract.cfm?PROC\\_ID=1765](https://www.smta.org/knowledge/proceedings_abstract.cfm?PROC_ID=1765).

**Weiller, A.J. 1994.** *Electronic Monitoring of Indoor Atmospheric Pollutants.* 1994.

**2008.** [www.smta.org/knowledge/proceedings\\_abstract.cfm?PROC\\_ID=1765](http://www.smta.org/knowledge/proceedings_abstract.cfm?PROC_ID=1765). [En línea] 2008.