

01180



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SIMULACIÓN ACELERADA DE LA
CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN
EQUIPO ELECTRÓNICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA
(INGENIERÍA MECÁNICA)

P R E S E N T A:

ARMANDO ORTIZ PRADO

DIRECTOR DE TESIS
DR. JORGE CARRERA BOLAÑOS



CD. UNIVERSITARIA

MARZO 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

Prefacio

Capítulo 1. Problemática del deterioro por corrosión atmosférica en dispositivos y sistemas electrónicos

1.1 Generalidades	1
1.2 Necesidad del desarrollo de métodos de prueba para la evaluación del comportamiento de equipo y dispositivos electrónicos bajo condiciones similares a las de servicio	4
1.3 Pruebas de corrosión empleadas por la industria electrónica	5
1.4 Planteamiento del problema	6

Capítulo 2. Corrosión atmosférica

2.1 Generalidades	7
2.2 Conceptos básicos de corrosión atmosférica	8
2.3 Etapas de la corrosión atmosférica	9
2.4 Necesidad de una perspectiva multifase para el estudio de la corrosión atmosférica	16
2.5 Efecto de los gases atmosféricos en la corrosión	21
2.6 Efecto de las partículas	24
2.7 Efecto de la temperatura	27
2.8 Mapas de corrosividad atmosférica	27
2.9 Mapa de corrosividad atmosférica para la república mexicana	34
2.10 Corrosión atmosférica en interiores	35
2.11 Algunos métodos empleados para la evaluación de la resistencia a la corrosión atmosférica	37

Capítulo 3. Deterioro de dispositivos electrónicos por efecto de la corrosión atmosférica

3.1 Antecedentes generales	40
3.2 Variables principales del daño por corrosión atmosférica. su efecto y procedencia	49
3.3 Metales y aleaciones comúnmente utilizadas en dispositivos electrónicos y su sensibilidad a la presencia de contaminantes	50
3.4 Inconvenientes generados por efecto de la corrosión atmosférica en diversos elementos y dispositivos electrónicos	52
3.5 Desarrollo de pruebas de corrosión para la industria electrónica	62
3.6 Clasificación de ambientes con respecto a su grado de corrosividad	65
3.7 Métodos de protección contra la corrosión en equipo y dispositivos electrónicos	67

Capítulo 4. Estudio del deterioro de equipo electrónico en México

4.1 Conceptos generales	70
4.2 Metodología propuesta para la determinación del deterioro de equipo y dispositivos electrónicos	75
4.3 Resultados del análisis del deterioro observado en tarjetas y dispositivos Electrónicos	79
4.4 Conclusiones	103

Capítulo 5. Diseño de una cámara de atmósfera controlada para la simulación acelerada de la corrosión en equipo electrónico

5.1 Conveniencia del desarrollo de una metodología <i>ad-hoc</i>	105
5.2 Condiciones del ensayo para simular en forma acelerada el daño por corrosión atmosférica	108
5.3 Definición de los requerimientos específicos del ensayo	108
5.4 Diseño conceptual	111
5.5 Diseño de detalle	114

Capítulo 6. Evaluación del comportamiento del equipo de simulación acelerada

6.1 Metodología para la evaluación del sistema	119
6.2 Pruebas en cupones de metales y aleaciones comúnmente empleados en equipo electrónico	119
6.3 Evaluación de la operación de la cámara de simulación acelerada de corrosión empleando tarjetas electrónicas	128
6.4. Conclusiones	140

Capítulo 7. Conclusiones

7.1 Discusión	142
7.2 Comentarios de los resultados obtenidos	144
7.3 Recomendaciones	145

<i>Referencias</i>	146
---------------------------	-----

Prefacio

El deterioro que por efecto del medio ambiente sufre el equipo y los dispositivos electrónicos es un hecho innegable. El que se presenten inconvenientes en su operación no requiere de importantes pérdidas de masa, como en la mayoría de los casos a los que el ingeniero se enfrenta. Lo anterior aunado al desconocimiento de los fenómenos así como a un reducido ciclo de vida (efecto de la velocidad de desarrollo de la tecnología) ha dado como resultado que en muchas ocasiones no se le dé la importancia adecuada a los efectos de la corrosión atmosférica. Sin embargo, el daño que por corrosión presentan el equipo y dispositivos electrónicos puede ser causa de fallas intermitentes, ruido en la señal o de incapacidad del sistema para seguir operando, situaciones que si bien en algunas clases de equipo doméstico no representan mayor problema que el económico que pueda causar su reposición, en otros casos, pueden resultar catastróficas como en los sistemas de control e instrumentación de instalaciones de reactores químicos, equipo de navegación aeronáutica, etc., o bien cuando se presentan altos costos de reposición del equipo.

Si bien el problema del deterioro del equipo eléctrico ha sido considerado desde la década de 1930, época en la que se iniciaron los estudios relacionados a los inconvenientes presentados en los relevadores de las primeras centrales telefónicas automáticas, no fue sino hasta finales de la década de 1960 cuando se le da un mayor énfasis a esta problemática (Guttenplan, 1987), a raíz de los inconvenientes que el equipo electrónico (comunicaciones, aviónica, etc.) presentó durante la guerra de Vietnam, esto a pesar que desde inicios de la misma década ya se habían desarrollado diversos ensayos (mezcla de gases) a través de los cuales se pretendía evaluar en forma acelerada el comportamiento de los dispositivos electrónicos ante la presencia de una atmósfera que pudiera ser químicamente agresiva. Desde entonces las diferentes investigaciones se han orientado a determinar las causas fundamentales y las condiciones bajo las cuales se genera deterioro que pueda afectar el correcto funcionamiento del equipo y dispositivos electrónicos. En general se puede afirmar que los inconvenientes que éstos presentan son más críticos ya que:

- a. El deterioro se puede presentar bajo condiciones (concentración de contaminantes) que son aceptables para el ser humano.
- b. Las pérdidas de masa, que pueden causar inconvenientes para la operación de los sistemas, son para la generalidad de los casos, despreciables.

Por otra parte, la problemática del deterioro del equipo por interacción con el ambiente cada vez tendrá mayor importancia debido a:

- i. La miniaturización de los dispositivos, y por consecuencia el incremento en su densidad (número de dispositivos por unidad de área).
- ii. La continua reducción de la distancia entre pistas conductoras (en la actualidad en los microcircuitos ésta es del orden de 0.5μ)
- iii. El empleo común de recubrimientos de metales nobles (los cuales son muy delgados, del orden de fracciones de micra, y usualmente porosos)
- iv. La aplicación de dispositivos electrónicos bajo condiciones ambientales que pueden ser potencialmente muy agresivas

Para la evaluación de la resistencia a la corrosión de equipo y dispositivos electrónicos se han desarrollado una serie de ensayos, a través de los cuales se pretende:

- a. Evaluar el comportamiento del sistema ya en condiciones de operación
- b. Reproducir los fenómenos que conllevan a la falla del equipo por efectos ambientales.
- c. Mostrar las debilidades o inconvenientes de un diseño

Dada la rapidez con la que se desarrollan nuevas tecnologías y el tiempo que tardan éstas en volverse obsoletas, es necesario que la evaluación de los sistemas se realice en forma ágil, de tal forma que los ensayos no solo reproduzcan los fenómenos sino que además lo hagan en forma acelerada.

Si bien en los últimos cuarenta años muy diversas organizaciones han trabajado al respecto, y esto se ha traducido en el desarrollo de diversas normas (JEIDA, BS, DIN, ISA, ASTM) muchas empresas del ramo no emplean éstas (por ejemplo utilizan cámara de niebla salina como mecanismo de evaluación) o en su defecto las normas, si bien desarrolladas *ex profeso* para la industria electrónica, no reproducen los fenómenos de deterioro observados ya en el campo. Con esta base se concluyó en la conveniencia de desarrollar, como parte del proyecto, un método de prueba *ad hoc* y diseñar el equipo que permita simular en forma acelerada los fenómenos de deterioro bajo diferentes condiciones, para establecer con los resultados, la prospectiva de operación del equipo.

La primera cuestión al momento de proponer una metodología se relaciona con ¿Cuáles son los fenómenos que es necesario reproducir?, esto con la intención de no repetir las pruebas propugnadas por diversos investigadores, algunas de las cuales se han normalizado. Para esto se determinó que la primera etapa del estudio debería permitir la definición de los mecanismos de falla, sin embargo las condiciones de corrosividad atmosférica no son únicas, sino más bien variables en tiempo y espacio. De esto se concluyó la conveniencia de estudiar en primera instancia el deterioro de sistemas que hubieran estado operando en campo durante periodos prolongados y bajo diferentes atmósferas tipo. Como sistema base o referencia se determinó la factibilidad de emplear tarjetas de equipo telefónico residencial, esto en virtud de que el estudio se orientó al ámbito de nuestro país. Bajo esta consideración el espécimen seleccionado se caracterizó por su homogeneidad (limitado número de modelos, un solo productor-Alcatel Indetel-, y una sola planta-Toluca-), así como por la amplia gama de situaciones en que estos se encuentran instalados. Por último, y considerando el equilibrio que debe de existir entre la extensión y la confiabilidad de la muestra a analizar, se concluyó en la conveniencia de analizar especímenes provenientes de diversas regiones y atmósferas tipo (rural, marina, industrial), situación por la cual se estudiaron equipos provenientes de México, D.F., Cocoyoc y Cuernavaca, Morelos, Tampico, Tamaulipas, Coahuila, Veracruz y Puerto Vallarta, Jalisco.

Para el estudio se siguió la siguiente metodología:

- a. Inspección a bajos aumentos –construcción de mapas de deterioro-
- b. Determinación de zonas críticas

- c. Inspección de elementos críticos mediante microscopía electrónica de barrido y determinación de la composición de los depósitos, esto con el fin de precisar la influencia de los diferentes agentes corrosivos de acuerdo a la región y el material analizado

Cabe mencionar que la definición de mapas de deterioro en la tarjeta permitió, en una primera etapa, definir el grado de ataque sufrido. En este punto es conveniente comentar que en varios de los casos no se generó mapa de corrosión dado que en la inspección a simple vista y a bajos aumentos (<30X) no se observaron depósitos o indicios de deterioro del sistema.

Considerando lo planteado en la literatura (artículos y normas) y los resultados de la inspección de la tarjeta se propuso una metodología de ensayo y se procedió a diseñar y construir el equipo de prueba, el cual se validó a través del ensayo de cupones patrón (cobre, aluminio, latón, acero galvanizado) y posteriormente con la evaluación de tarjetas similares a las que fueron analizadas en primer instancia.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el procedimiento de prueba propuesto así como el equipo diseñado reproducen en forma acelerada los fenómenos que se presentan en el equipo expuesto a condiciones atmosféricas nominales en un país como México. Además la facilidad de reprogramación del sistema y la versatilidad de éste lo muestran como una opción viable y con diversas bondades con relación a los sistemas existentes a la fecha.

Considerando las metas planteadas, el presente trabajo se ha estructurado de tal forma que en este reporte se discute en su primera parte (capítulos 1 al 3) lo relativo a la problemática, que por corrosión, presenta el equipo electrónico. En la segunda parte (capítulos 4 y 5) se analiza el deterioro de equipo electrónico sometido a diferentes condiciones ambientales para así realizar la propuesta de ensayo y el diseño del equipo. Por último, la tercera parte del reporte (capítulos 6 y 7) corresponde al análisis de los resultados obtenidos en la evaluación del sistema. En particular el capítulo 6 se orienta a la metodología de evaluación del sistema, mientras que el capítulo 7 corresponde al análisis y discusión de los resultados.

Se pretende que este trabajo permita:

- a. Consolidar esta línea de investigación, la cual ha sido poco explotada en nuestro país
- b. Definir una metodología de evaluación de daño en equipo electrónico por efecto de la corrosión atmosférica
- c. Con base en los resultados, emitir recomendaciones orientadas al diseño y comportamiento del equipo.

Finalmente no queda más que agradecer todo el apoyo brindado por todos mis compañeros en las diferentes etapas de desarrollo de este proyecto, en particular al Dr. Jorge Carrera por su confianza, a los Ingenieros Ignacio Cueva y Efraín Ramos en el Diseño de detalle y la construcción de la cámara de prueba, así como en las pruebas de validación realizadas, al Biólogo Germán Álvarez por gran parte del trabajo de inspección y análisis de muestras en el microscopio electrónico de barrido (SEM), al M. en C. Rafael Schouwenaars por sus valiosos comentarios e ideas que mucho ayudaron en el análisis de la problemática y en la orientación del tema, así mismo es pertinente darle crédito por algunas de las imágenes de SEM del capítulo 4, al M. en I. Víctor Hugo Jacobo por la revisión del documento y por todas sus sugerencias en cuanto a su

estructura y forma, pero sobre todo por su amistad, y a la M. en I. Sara Mercedes Cerrud por todo su apoyo a lo largo del proyecto sin el cual éste no se hubiese concluido satisfactoriamente. Es conveniente también mencionar el apoyo económico, que en la primera etapa del proyecto, brindó la empresa Alcatel Indetel (Atlinks de México, S.A.), lo cual permitió cubrir los gastos de construcción de la cámara.

Ciudad Universitaria, Coyoacán, México, D.F. marzo del 2004

Armando Ortiz Prado

Capítulo 1. Problemática del deterioro por corrosión atmosférica en dispositivos y sistemas electrónicos

1.1 GENERALIDADES

Los materiales expuestos a la atmósfera sufren daños por corrosión, fenómenos que se ven afectados por humedad, gases contaminantes, cloruros, agentes orgánicos volátiles, actuando el ozono y la luz ultravioleta como catalizadores teniendo también influencia la presencia de partículas [1]. La magnitud de los daños depende de la composición característica de la atmósfera (tipos de contaminantes y su concentración), variación de la temperatura, así como de la sensibilidad de cada material a las condiciones del ambiente. Si bien el costo de la corrosión se estima del orden del 4 al 5% del PIB se acepta que en países industrializados el 50% de estas pérdidas son debidas a corrosión atmosférica [2].

Los principales contaminantes gaseosos, desde el punto de vista de corrosión atmosférica (CA) son O₃, SO₂, CO₂, NO_x y el Cl en varias formas [3]. Estos se encuentran en cantidades abundantes en regiones donde existe una alta densidad de población, y/o concentración de la planta productiva. Además de los contaminantes mencionados, juegan un papel fundamental. El grado de humedad del ambiente y la variación de temperatura. En regiones cercanas a las costas los iones cloro se encuentran en grandes concentraciones, factor importante en los procesos de corrosión.

El estudio formal de la CA dio inicio con el trabajo de W.J.H.Vernon (*A laboratory study of the atmospheric corrosion of metals.*, Trans. Faraday Soc, 1931). A la fecha los métodos de prueba siguen siendo muy similares a lo propuesto hace más de 80 años, a diferencia de lo que ha sucedido con otras áreas de la ciencia, aún de la propia corrosión, en donde los estudios fundamentales han permitido la comprensión de los fenómenos y por lo tanto su modelado, mientras que el estudio de la CA sigue siendo en mucho de tipo experimental. El retraso en el desarrollo de modelos precisos que permitan describir los fenómenos que se suscitan durante la CA se debe a la complejidad intrínseca que encierra el análisis de ésta, considerando los fenómenos e interacciones que se dan durante su presencia (al interior de la atmósfera, en la interfase electrolito-gas, en el propio electrolito, en la interfase líquido-sólido), situación cuyo estudio demanda de una visión multidisciplinaria.

Si bien el análisis de los fenómenos de la CA es de suyo complejo más aún resulta lo correspondiente a la problemática de deterioro que por medio ambiente se presenta en el equipo electrónico, ya que en éste mínimas pérdidas de masa (por ejemplo en un microcircuito una picadura del orden de fracciones de micra y la reacción de 10⁻⁹ gr puede ser más que suficientes para la interrupción de la continuidad), intrascendentes para otro tipo de sistemas, pueden en éstos ser causa fundamental de su falla [4]. Lo anterior da lugar a la necesidad de aplicar técnicas más desarrolladas (microscopía de fuerza atómica, espectroscopía infrarroja, etc.) que permitan la evaluación *in situ*, así como un mayor detalle, en cuanto al análisis de las superficies. Por otra parte se demanda también de nuevos métodos de prueba que garanticen un control más preciso de los principales parámetros que inciden en la corrosión atmosférica, orientados al estudio de los fenómenos que se suscitan en el equipo y dispositivos electrónicos [1,5].

En general se reconoce que las fallas en equipo electrónico por efecto del medio ambiente se deben fundamentalmente a:

- i. Resistencias de contacto producto de la formación de depósitos no conductores.
- ii. Pérdida de la continuidad por corrosión de las pistas o elementos conductores.
- iii. Cortocircuitos, producto de partículas depositadas sobre las pistas conductoras, por condensación de humedad sobre éstas o por la formación de depósitos filiformes.

En la década de los 1960's se reconoció el efecto de la corrosión atmosférica en el equipo electrónico [6], esto en particular por los inconvenientes observados en la aviónica de los aparatos norteamericanos estacionados en Vietnam durante la guerra. Los análisis de falla realizados demostraron que los problemas se habían presentado como consecuencia de las condiciones ambientales extremas características de esa región del planeta. Lo anterior se suscitó en virtud de que durante el diseño no se consideró la posibilidad de deterioro, en el equipo electrónico, por medio ambiente, situación que aún en la actualidad en muchos de los diseños electrónicos se menosprecia, en algunas ocasiones por falta de información, en otras por que se opina que las condiciones de servicio son inocuas para los sistemas electrónicos (aire acondicionado) y por último basados en la vida útil promedio, dado que el rápido avance de la tecnología vuelve obsoleto el equipo electrónico antes de que el deterioro por corrosión se manifieste. A raíz de las observaciones de las fallas en equipo electrónico militar hace ya más de treinta años, se dió inicio al estudio relativo a las causas y mecanismos de la corrosión en dispositivos electrónicos.

Es indudable la importancia que en la vida actual tiene el equipo electrónico, así como que esta se irá incrementando. De acuerdo a las estadísticas publicadas por la oficina de censos de los EUA (*US Census Bureau*) para 1997 el costo del equipo electrónico manufacturado tan sólo en EUA era del orden de 335 mil millones de dólares. Al inicio del milenio [4] la importancia que puede tener el deterioro del equipo electrónico por efecto del medio ambiente se ejemplifica considerando tan solo algunas cifras para los EUA, donde la mayoría de los 200×10^6 de automóviles que circulan tienen componentes electrónicos, ni que decir de los casi 100 millones de equipos PC que se estima se comercializaron hacia el año 2000, de las más de 7000 radiodifusoras, o de las casi 1600 estaciones de televisión. Todo esto indica que si bien mucho de este equipo se encuentra bajo condiciones ambientales controladas (sistemas de aire acondicionado, depuradores de partículas) existe una parte muy importante que funciona sin ninguna restricción en el ambiente. Ahora si dicho análisis se orienta a las llamadas economías emergentes, como es el caso de México, en donde las características del medio ambiente son en general más demandantes, se concluye en la necesidad de estudiar estos tópicos, para así definir los efectos, y por consecuencia las previsiones, que se deberán tener para limitar los daños que por medio ambiente presente el equipo electrónico.

Guttenplan [6] define la problemática de la corrosión en la industria electrónica, de acuerdo a las siguientes tendencias en el diseño:

- Mayor número de componentes por unidad de área, los cuales son cada vez más pequeños y el espaciamiento entre éstos es menor. Las secciones de las pistas conductoras son también de menores dimensiones, lo que se traduce a elevados gradientes de potencial.

- Demanda de pistas conductoras con menor resistencia.
- Exposición del equipo electrónico a condiciones más severas.

De lo reportado por diversos autores [6,7,8] se concluye que pequeñas cantidades de contaminantes, muy por debajo de los umbrales de aceptación para el ser humano, pueden causar daños que conllevan a la falla del equipo. Niveles bajos de humedad y contaminantes agresivos pueden causar problemas en circuitos impresos, circuitos integrados, conectores eléctricos, potenciómetros, pilas y otros componentes electrónicos. Adicional a lo anterior se tiene la tendencia al uso generalizado de equipo de alta tecnología, en el que la calidad de salida de las señales producidas los vuelve más sensibles a mínimos daños, producto de su interacción con el medio ambiente.

La corrosión en equipo electrónico puede ocurrir durante la manufactura, almacenaje, transporte o desde luego durante el servicio. Los principales agentes promotores del deterioro son humedad, cloruros, H₂S, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco y partículas suspendidas; las cuales pueden favorecer la precipitación de humedad (carácter higroscópico) a la vez de modificar la composición del electrolito y con esto generar el fenómeno.

El ambiente al que están expuestos los circuitos electrónicos proviene de dos fuentes: los materiales de los que está construido el equipo y los residuos de su propia manufactura, así como la atmósfera en sí misma.

Gouda [7] estudió en 1989 casos de corrosión en componentes de hardware mediante análisis microscópico y EDS (energy dispersive spectroscopy), determinando que, concentraciones de gases contaminantes 10 veces menores al límite permitido para el hombre, pueden dañar el equipo electrónico. Los laboratorios de aeronáutica de la fuerza aérea norteamericana han estudiado varios casos de falla por corrosión en sistemas electrónicos. De estos estudios [8] se ha concluido que el 80% de las fallas eléctricas y electrónicas se deben a defectos en materiales y procesos de manufactura y el 20% se relaciona específicamente a problemas de corrosión.

Los principios básicos que dan lugar al deterioro del equipo electrónico por efectos corrosivos son evidentemente los mismos que rigen cualquier proceso de esta índole, con la particularidad que ya ha sido mencionada en cuanto al efecto de la magnitud del daño (pérdidas de masa del orden de miligramos o menores pueden ser críticas), que la corrosión por sí misma puede producir la falla del sistema, así como el efecto de los gradientes de potencial que se presentan al estar operando el equipo.

Al referirse a la corrosión en equipo electrónico es conveniente, por sus características clasificar ésta en:

- a. Deterioro de dispositivos macro, tales como conectores, soldaduras, circuitos impresos, interruptores, etc.
- b. Deterioro en microelectrónica, básicamente en lo que se refiere a circuitos integrados
- c. Deterioro en sistemas de almacenamiento magnético de datos

En particular el proyecto que se presenta está orientado sobre todo a lo que se refiere a la degradación de componentes electrónicos mayores.

Dicho lo anterior es conveniente remarcar que el deterioro del equipo electrónico por efecto del medio ambiente presenta una serie de peculiaridades que lo convierten en un tema particular para el que la corrosión atmosférica es solo una referencia.

1.2 NECESIDAD DEL DESARROLLO DE MÉTODOS DE PRUEBA PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE EQUIPO Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS BAJO CONDICIONES SIMILARES A LAS DE SERVICIO

Los fabricantes de equipo electrónico, por ejemplo de equipo telefónico residencial, han observado que los aparatos presentan fallas en el servicio por efecto del medio ambiente, razón por la que se han empleado una serie de ensayos mediante los que se ha pretendido evaluar este efecto. En general las pruebas no corresponden a las condiciones de servicio (cámara de niebla salina) o los resultados obtenidos no se pueden correlacionar con lo observado en campo (cámaras de ciclos de temperatura).

Por otra parte dada la variabilidad de las condiciones atmosféricas a las que es sometido el equipo, a pesar de encontrarse éste en interiores, es necesario que cualquier método de ensayo pueda reproducir las condiciones de operación y como consecuencia el daño, todo esto en forma acelerada, por lo que cualquier método de prueba deberá permitir el ajuste de las condiciones.

Como muestra de la variabilidad de las condiciones ambientales se puede mencionar el caso de México, cuyo clima va desde tropical lluvioso hasta el frío característico de las altas montañas [9] esta diversidad y peculiaridades son debidas a su topografía y altitud. Las condiciones ambientales, además, varían durante el año. Las temperaturas mínimas y máximas absolutas en México son del orden de -10°C y 40°C respectivamente, mientras que la humedad relativa varía entre los 30% y 100%, condiciones que se ven atenuadas cuando se hace referencia a interiores. Por otra parte, los contaminantes presentes y su concentración son variados, aún en el interior de la misma zona metropolitana de la Ciudad de México, dando como consecuencia que equipos del mismo tipo puedan estar instalados en regiones de muy diversa corrosividad.

En sí el problema radica en identificar el efecto que el medio ambiente tiene en el desempeño del equipo electrónico, esto con el fin de conocer las limitaciones en la vida útil del aparato, lo cual se podrá lograr al efectuar pruebas de simulación que reproduzcan los efectos de las condiciones atmosféricas y de calidad del aire.

Dada la rapidez con la que la tecnología, se desarrolla en el ramo de la electrónica y por consecuencia la velocidad con la que se vuelve obsoleta, es necesario que cualquier evaluación efectuada al equipo o dispositivos se realice en forma rápida, precisa y repetible, ya que de otra forma se perderá tiempo valioso para acceder al mercado, o en su defecto se habrán erogado cantidades orientadas a pruebas que ninguna garantía ofrecen con relación al comportamiento en campo.

1.3 PRUEBAS DE CORROSIÓN EMPLEADAS POR LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA

Las pruebas aceleradas para simular el efecto de la corrosión, tienen como objetivo determinar la sensibilidad del equipo a las características medio ambientales, para así proporcionar información que permita encontrar el tiempo de vida real de un producto, a la vez de evaluar la problemática que las fallas por corrosión generan en el equipo. Con el trabajo de Campbell y Thomas en 1930, se dio inicio al desarrollo de pruebas ambientales en equipo eléctrico. A lo largo de 70 años se han desarrollado una gran variedad de métodos de ensayo que por lo general incluyen uno o varios de los siguientes contaminantes: SO₂, O₃, NO_x, HCl, NH₃ y H₂S; a la vez de considerar a la humedad y temperatura, las cuales pueden permanecer constantes durante el ensayo o variar en forma cíclica. De tal forma es posible simular diferentes condiciones de trabajo.

En un principio se emplearon pruebas con altas concentraciones de un solo gas como dióxido de azufre ó H₂S. Posteriormente se desarrollaron pruebas con mezclas de gases combinados con humedad. Algunas pruebas estandarizadas que utilizan un sólo gas son:

- IEC Test K_c, SO₂. [10]
- IEC Test K_c, H₂S. [11]
- JEIDA-32 sobre SO₂. [12]
- JEIDA-25 sobre H₂S [13]
- BS 2011, Parte 2.1. [14]
- DIN 40046 Partes 36 y 37 [15]

Otras pruebas de corrosión estandarizadas emitidas por la ASTM las cuales son utilizadas para la evaluación de sistemas y dispositivos electrónicos son:

- B117 Salt spray fog test
- B287 Salt spray fog test– Acetic Acid
- B368 Copper-Accelerated Acetic Acid Salt Spray Fog Test
- G 87-84 Standard Practice for Conducting Moist SO₂ Tests

Las pruebas anteriores no presentan una correlación con el servicio real. Son generalmente sobresimplificaciones del ambiente con condiciones de exposición severas y su empleo se limita al análisis comparativo del comportamiento de materiales y recubrimientos.

En 1996, Zakipour y Leygraf [16] evaluaron diferentes pruebas de laboratorio que simulan la corrosión en interiores para materiales empleados para contactos eléctricos. Encontraron que se obtienen resultados similares a lo observado en campo con mezclas de gases húmedos contaminados con SO₂, NO₂, NH₃ y H₂S.

En 1997, Zakipour *et al* [17] estudiaron el efecto de SO₂, NO₂ y ozono en ensayos para níquel, determinando que el NO₂ y el ozono promueven la corrosión al estar mezclados con SO₂. Oesch y Faller [18] realizaron pruebas con ozono, SO₂, NO y NO₂ y determinaron que éste, además de ser un acelerador de la corrosión junto con otros contaminantes, es un fuerte agente corrosivo por sí solo (situación que no es aceptada en otros reportes los cuales consideran a éste como un precursor o catalizador).

1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los componentes, dispositivos, conexiones, tarjetas y sistemas electrónicos en general sufren deterioro por efecto del medio ambiente, el cual reduce el ciclo de vida del sistema a la vez de generar problemas durante la operación de los equipos. Si bien solo un 20% de las fallas que sufre el equipo electrónico se pueden correlacionar con corrosión en algún componente de éste en general el fenómeno ha sido soslayado sobre todo por falta de conocimiento y por las condiciones de control de atmósfera comunes al equipo instalado en países industrializados, que reducen la presencia de fallas por estos factores.

Sin embargo, es necesario conocer las condiciones que propician las fallas del equipo, razón por la cual un estudio detallado del tipo de daño y su génesis permitirá replantear condiciones de diseño, características de recubrimiento y métodos de protección del equipo electrónico, las cuales abarquen desde el almacenaje de las partes hasta la operación del mismo. A partir de la interpretación de los mecanismos de deterioro es factible proponer métodos que reproduzcan de manera acelerada éstos, resultados que permitirán incidir en forma rápida y económica en mejoras de diseño así como en la seguridad del productor en cuanto a la confiabilidad de sus equipos ya que los ensayos *in situ*, dada la dinámica del sector, son inviables.

Con base en lo anterior se planteó el objetivo del presente proyecto, el cual se orientó a la determinación del efecto de las variables ambientales en el daño que por corrosión, presenta el equipo electrónico. Lo anterior permitió definir procedimientos para la evaluación acelerada del deterioro por efecto de medio ambiente. Con esta base se diseñaron los sistemas que mejor garantizan la simulación acelerada del daño. El análisis de los resultados de la simulación acelerada permite estimar el comportamiento de los sistemas y dispositivos electrónicos bajo ambientes específicos.

La hipótesis bajo la cual se desarrolló el proyecto es la relativa a la factibilidad de relacionar los resultados obtenidos en pruebas aceleradas de laboratorio con el daño que componentes y equipo electrónico presentan por efecto de corrosión atmosférica. Con esto se evita la necesidad de realizar ensayos *in situ*, los cuales requieren de largos periodos de exposición. Asimismo, los ensayos acelerados permiten estimar el comportamiento de los sistemas electrónicos con las condiciones ambientales de cada zona climática.

Capítulo 2. Corrosión atmosférica

2.1 GENERALIDADES

El deterioro sufrido por efectos ambientales en el equipo electrónico tiene particularidades en cuanto a las condiciones bajo las que se presentan daños significativos, sin embargo, no hay duda de que los principios y condiciones que influyen en la corrosión atmosférica (CA) tendrán un importante efecto en las fallas encontradas en los dispositivos electrónicos.

Lo anterior vuelve evidente la necesidad de plantear las bases conceptuales de la CA, la cual sin duda es uno de los fenómenos de deterioro que han sido más estudiados, y de los que a la fecha se tienen todavía dudas en cuanto a su modelado y caracterización mediante ensayos en el laboratorio (dada la complejidad de la interacción de las variables involucradas).

La CA se define como la degradación sufrida por los materiales que están en contacto con el aire, y por ende con los constituyentes y contaminantes de éste [19].

Sus factores más importantes son:

- i) Variación de temperatura
- ii) Ciclos de humedad
- iii) Contaminantes gaseosos presentes en el aire. Composición y concentración
- iv) Partículas suspendidas. Composición, tamaño y concentración.

Tipos de atmósferas

Para la mejor comprensión de como afecta el medio ambiente en la corrosión atmosférica, se han agrupado las condiciones climatológicas y los contaminantes, en diferentes tipos de ambiente. Los principales son:

- i) **Industrial;** se caracteriza por las emisiones de la industria pesada, en particular por presentar todo tipo de contaminación por azufre en forma de dióxido de azufre principalmente, el cual proviene en su mayoría de la combustión. Asimismo se presentan concentraciones importantes de cloruros, fosfatos y nitratos.
- ii) **Urbano;** este tipo de ambiente es similar al rural con bajo nivel de emisiones producto de la industria pesada, sus contaminantes provienen también de la combustión de materiales fósiles fundamentalmente producidas por fuentes móviles, así como las antropogénicas características. Los contaminantes más usuales son NO_x (NO + NO₂) y SO_x, principalmente.
- iii) **Marino;** Se caracteriza por tener altas concentraciones de cloruros. La concentración de NaCl en este ambiente se mantiene superior a los 15 mg/m² -día, no importando el nivel de SO₂ que se presente. La corrosividad se puede ver incrementada por la existencia de industria en la zona, así como también por la temperatura y la dirección de los vientos dominantes.
- iv) **Rural;** Se caracteriza por la presencia de contaminantes provenientes del empleo de fertilizantes y la descomposición de materia orgánica lo cual da como resultado la activación de otros mecanismos de corrosión, debido a la presencia de iones amonía, nitratos, etc.

Se pueden plantear subgéneros a este tipo de ambientes o combinaciones, resultado de los contaminantes principales. Desde el punto de vista de los contaminantes se podría hacer referencia a atmósferas marino industrial, por ejemplo Tampico y Coatzacoalcos, o referir que zonas del sur de la ciudad de México (ciudad universitaria, por ejemplo) se pueden caracterizar por una atmósfera rural muy a pesar de estar en plena zona metropolitana.

La concentración de contaminantes en exteriores e interiores se ve influida por las características de las construcciones, donde resulta evidente que aquellas que cuentan con aire acondicionado presentan condiciones, para muchos de los contaminantes, muy por debajo de las exteriores. Por su parte en climas como el de México es muy usual que las concentraciones de los contaminantes sean muy similares en el interior y exterior, con el inconveniente adicional de la presencia, en interiores, de una alta concentración de contaminantes producto de las actividades del ser humano.

Si bien, la mayoría de los estudios se han desarrollado para corrosión en exteriores y se considera ésta como la más agresiva, es necesario considerar que el equipo electrónico va a estar expuesto a una condición típica de interiores, en donde la presencia de humedad sobre las superficies metálicas se debe a fenómenos de condensación.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA

La corrosión atmosférica es uno de los procesos de deterioro más importantes, ya que se acepta que ésta sola representa alrededor del 50 % del costo total de la corrosión, esto es del orden del 2% PIB en un país desarrollado tal como EUA, Canadá, o la Comunidad Europea. Solo para la industria aeronáutica en los EUA representa un costo [19] del orden de 4000 millones de dólares anuales (1995).

Considerando las particularidades de los fenómenos que dan lugar a la CA se pueden distinguir las siguientes situaciones [20]:

- i. Corrosión atmosférica seca. En este caso no existe evidencia visible de la capa de electrolito sobre la superficie del metal sometido a corrosión. La composición de la solución varía sensiblemente en función del tiempo.
- ii. Corrosión atmosférica bajo condiciones de humedad moderada.
- iii. Corrosión atmosférica bajo condiciones de humedad apreciable. Las condiciones de las reacciones son similares al caso (ii). Se considera que el espesor del electrolito es suficiente para que la composición de éste no se modifique por efecto de las reacciones de reducción y oxidación.

Si bien algunos autores [2] consideran que a pequeños espesores de la capa de condensado no se presentará corrosión, esto en sentido estricto no es verdadero, sobre todo si se trata de fenómenos como los que son característicos del deterioro de equipo electrónico. Lo que sí se puede considerar es la forma en que se darán las reacciones, ya que un espesor importante del electrolito permite considerar a éste como una fuente o sumidero inagotable, mientras que en el otro caso su composición variará en forma importante en función de la evolución de los procesos.

La complejidad de los fenómenos que dan lugar a la corrosión atmosférica es indiscutible ya que incorpora un amplio espectro de procesos químicos, físicos y electroquímicos en el dominio de las interfases gas-líquido-sólido, lo que se traduce en la imposibilidad práctica de su modelado y la dificultad de reproducir sus efectos con precisión en condiciones de laboratorio.

Las diferentes etapas por las que se transita para dar lugar al deterioro del material se producen en diversos intervalos de tiempo, ya que los fenómenos iniciales solo requieren en algunos casos de del orden de segundos, mientras que los estados avanzados se pueden presentar después de de varios años (figura 2.1).

Los campos del conocimiento que involucra la corrosión atmosférica son [20]:

1. Química atmosférica.
2. Transporte de masa y ciencia de las interfases.
3. Química de las soluciones acuosas, comportamiento de capas líquidas de pequeño espesor (solo algunas decenas de monocapas de agua) o comportamiento volumétrico (capas de humedad de un espesor tal que pueden ser observadas a simple vista).
4. Química de los depósitos y de los sólidos.

Por facilidad y con la intención de profundizar posteriormente en los efectos de la corrosión atmosférica en diversas condiciones es necesario describir primero las diferentes etapas de ésta así como sus reacciones características.

2.3 ETAPAS DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

La primera etapa de la interacción entre el sólido y la atmósfera es la reacción instantánea de la molécula de agua con el metal, en este caso el enlace se puede dar en forma molecular (a través del átomo de oxígeno al metal o algún otro constituyente superficial de carga positiva). La fuerza dominante para la disociación del agua es la formación de enlaces metal-oxígeno o metal-oxidrilo. Los grupos oxidrilo al formarse (figura 2.2) actúan como sitios preferentes para la adsorción de agua.

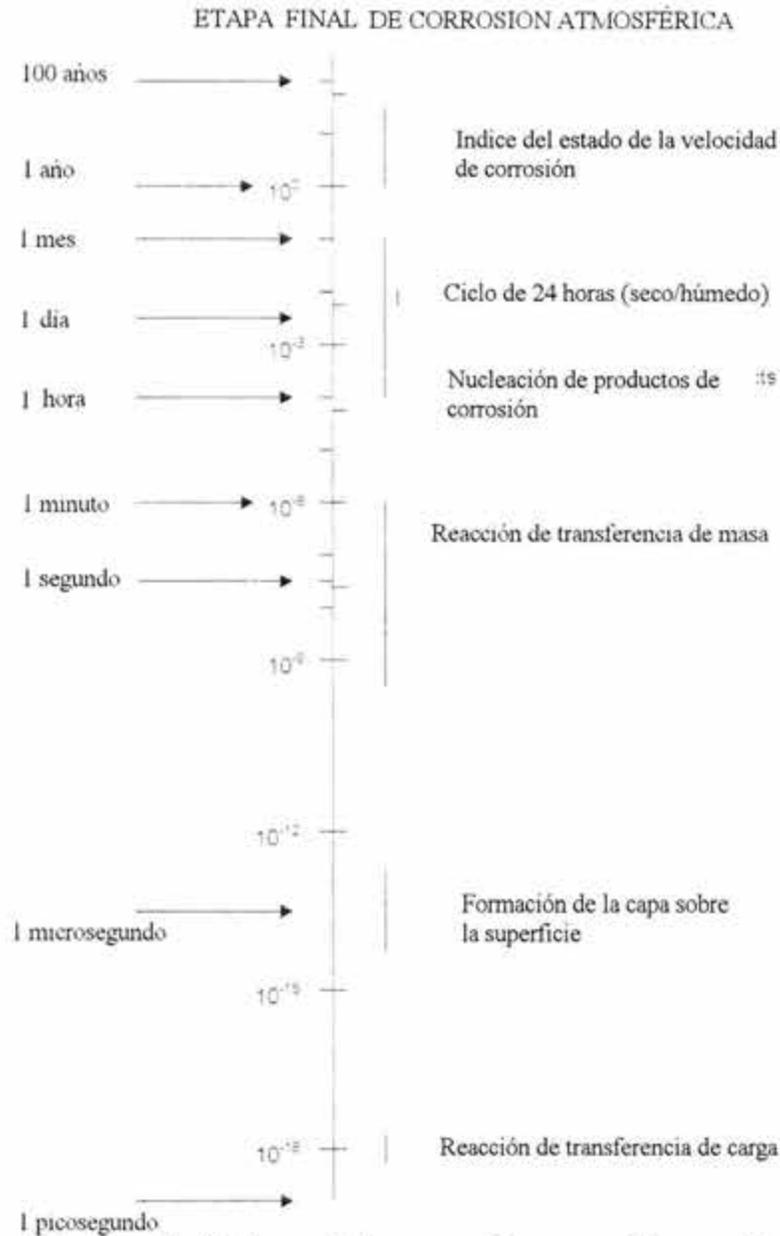


Figura 2.1 Ordenes de magnitud de los periodos requeridos para el desarrollo de los fenómenos característicos de la corrosión atmosférica [20].

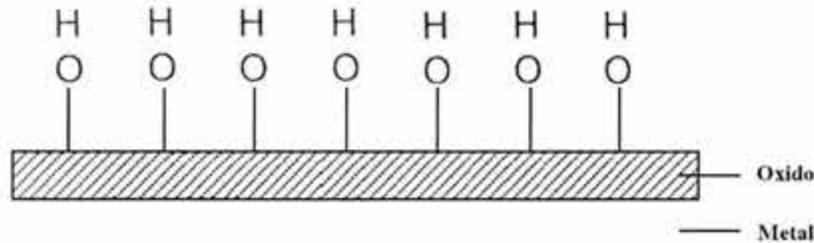


Figura 2.2. Descripción esquemática del acomodo de los iones hidróxido en la superficie formada por óxidos [20].

La formación de la capa superficial de (OH⁻) es un proceso muy rápido, ocurre en una pequeña fracción de segundo y provoca una superficie menos reactiva con el agua. Si se tiene una mayor exposición a la atmósfera, la adsorción de agua será en forma molecular.

De los estudios realizados en superficies metálicas con capas delgadas de óxido o hidróxido han demostrado que la cantidad reversible de agua adsorbida depende de la humedad relativa (figura 2.3) del tiempo de exposición y de la naturaleza del sustrato.

La variación de las características en la adsorción del agua por parte de superficies metálicas depende de las propiedades de éstas, de sus características superficiales, de la porosidad, así como de la presencia de partículas que luego de depositarse actúan en forma higroscópica, incrementando así el espesor de la capa adsorbida.

Las superficies metálicas son muy heterogéneas debido a las irregularidades de éstas y a la presencia de defectos que las interceptan (límites de grano, dislocaciones, precipitados, inclusiones, etc.), los cuales se caracterizan por su mayor nivel de energía. Por estas circunstancias la adsorción del agua por parte de la superficie es heterogénea, de tal forma que los productos de reacción se pueden formar como islas o películas que varían sustancialmente su espesor sobre la superficie.

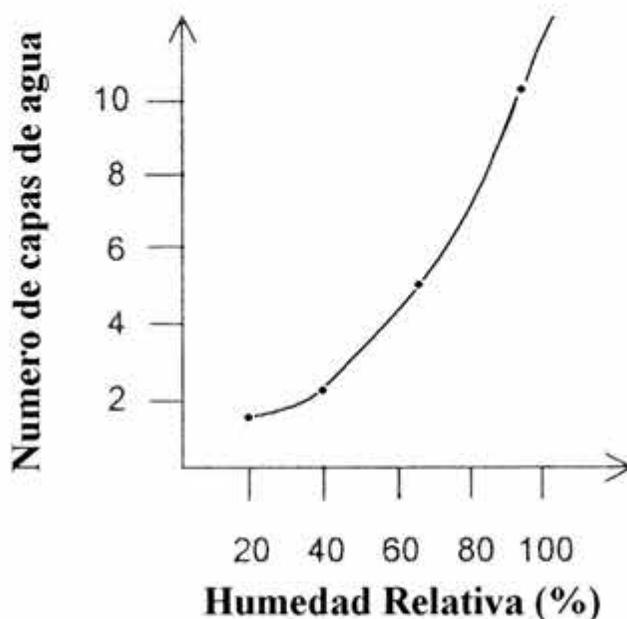


Figura 2.3. Número de moléculas de agua que dan lugar a la película higroscópica la cual depende fundamentalmente de la humedad relativa [20].

En la corrosión atmosférica las reacciones electroquímicas ocurren en la interfase entre el sustrato sólido y la capa de agua. La heterogeneidad de las superficies da lugar a la presencia de algunos sitios con un comportamiento predominante catódico, mientras que otros dan lugar a reacciones preferentemente anódicas. Las reacciones dominantes en la corrosión atmosférica son:



Los productos de reacción durante las primeras etapas de deterioro se presentan en forma aislada. Las áreas anódicas se encuentran en las zonas adyacentes a donde se depositan los productos de reacción, mientras que las catódicas corresponderán a las regiones definidas entre las zonas de depósito. Debido al acceso inmediato del oxígeno del aire a la capa líquida de la superficie, la reacción anódica tiende a ser la limitante del proceso más que la reacción catódica.

En etapas posteriores del proceso la fase acuosa actúa no solamente como un medio propicio para las reacciones electroquímicas, sino también como un solvente para los constituyentes atmosféricos, sean gases o partículas. Los contaminantes atmosféricos que mayor influencia tienen en el proceso son: dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfhídrico (H₂S), bióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃), ozono (O₃), peróxido de hidrógeno (H₂O₂), y formaldehído (HCHO); además de que en forma de partículas se tiene al cloruro de sodio (NaCl), sulfatos de amonio ((NH₄)₂SO₄), cloruro de amonio (NH₄Cl) y sulfato de sodio (Na₂SO₄). En algunos casos estos constituyentes están incorporados en la capa líquida como componentes de la lluvia, rocío, niebla o nieve. En otros casos, el proceso de formación de depósitos incluye impacto o difusión hacia la superficie.

Cuando la capa acuosa y la atmósfera están en equilibrio, la actividad química de cualquier constituyente gaseoso disuelto en la capa acuosa es directamente proporcional a la presión parcial del mismo. Sin embargo, en una gran mayoría de ocasiones durante la corrosión atmosférica, las condiciones están muy alejadas del equilibrio, lo cual se debe a la baja velocidad de formación de los depósitos de muchos componentes atmosféricos, la que a su vez es influida por la velocidad del viento, las características del flujo de aire y la composición de la capa líquida superficial.

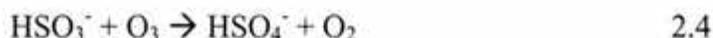
El depósito de constituyentes en la capa acuosa conlleva un gran número de reacciones químicas y electroquímicas. Puede provocar también en ocasiones productos de reacción volátiles de la fase acuosa que van a la atmósfera.

Entre los factores que hacen improbable que la capa líquida se encuentre en equilibrio químico con la atmósfera están las variaciones diarias en las condiciones atmosféricas. Tanto el espesor de la capa líquida como su composición varían durante el día y la estación. De esta forma, el pH de la capa acuosa puede variar de neutro para grandes espesores de la capa acuosa a muy ácido para espesores pequeños.

De diversos estudios que se han realizado a la fecha se puede definir la función realizada por los principales constituyentes atmosféricos [21], así como las transformaciones relativas a la química de la capa líquida. En el trabajo antes referido se evalúa el efecto sobre zinc al ser expuesto a una atmósfera sintética (controlada) conteniendo SO₂ y O₃ ó SO₂ y NO₂. Cuando el zinc se expone a aire húmedo que contiene solamente SO₂, el gas se deposita en la capa acuosa y forma iones bisulfito:



La adición de ozono estimula claramente la velocidad de formación de depósitos de SO₂ además la reacción de éste es mucho mayor en presencia de SO₂. Los resultados sugieren que los gases disueltos reaccionan de manera estequiométrica y forman iones bisulfato:



Por su parte el NO_2 muestra un comportamiento distinto al del ozono en presencia de SO_2 , ya que la velocidad de formación de depósitos es mucho mayor cuando hay NO_2 presente.

Entonces tanto el ozono como el NO_2 estimulan la oxidación del azufre acelerando de este modo la corrosión pero con mecanismos distintos.

Los iones formados en la capa de líquido pueden actuar de manera individual con la superficie del metal y así acelerar su disolución (figura 2.4).

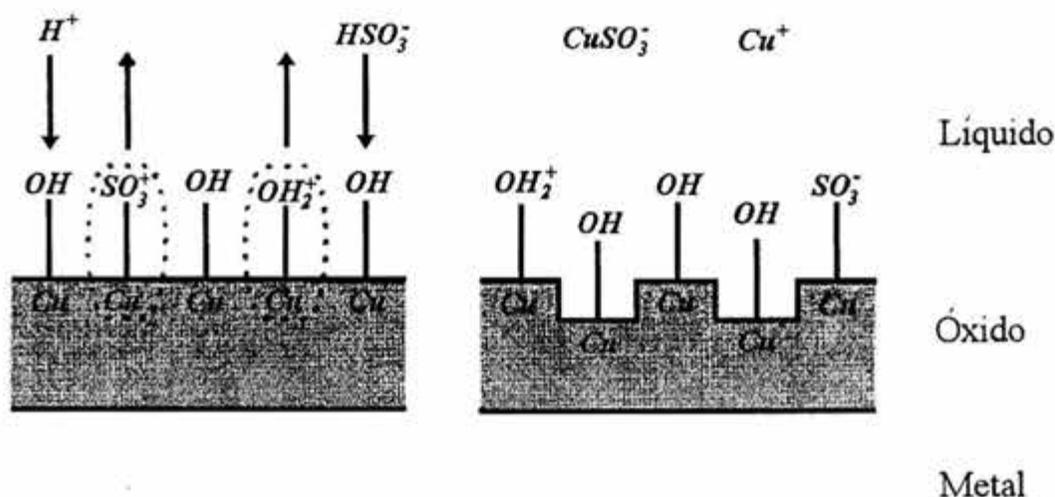


Figura 2.4 La interacción con los iones H^+ favorece la disolución del metal antes (izquierda) y después (derecha) de que se presenten reacciones de corrosión [20].

La superficie del óxido metálico se caracteriza por la presencia de grupos oxidrilos adyacentes a la capa líquida, esto para condiciones iniciales de exposición atmosférica. Estos grupos presentan buenas propiedades de intercambio iónico, y pueden ser reemplazados fácilmente por iones de la capa líquida. Entre los iones que sufren el intercambio se tiene H^+ , HSO_3^- , HSO_4^- . Mientras ocurre este reemplazo, los enlaces entre los átomos metálicos superficiales y sus vecinos inmediatos pueden debilitarse, facilitando así la disolución metálica. Este fenómeno se considera como uno de los procesos más importantes de corrosión atmosférica en su etapa inicial. Estos procesos no están totalmente comprendidos a nivel molecular, sin embargo se considera que los iones H^+ tienen un papel protagónico, ya que cuando se liberan pueden desplazarse con facilidad entre distintos sitios de la superficie del metal. Un átomo metálico superficial rodeado por uno o más vecinos ligados por H^+ está más propenso a desunirse de la red de óxido metálico. Cuando el ión metálico deja la red el enlace roto en la superficie se hidroxila inmediatamente y los iones hidrógeno involucrados en este proceso son liberados, y pueden tomar parte en la separación de otro átomo de la superficie metálica. De manera simultánea, a la vez que se da la disolución de los óxidos metálicos se da su regeneración, con la característica de que la formación del óxido es mucho más rápida.

Cuando el ión metálico se disuelve en la capa líquida se puede aparear con los iones de carga opuesta que encuentre. Este proceso depende de la naturaleza del ión metálico y de los cationes presentes, aunque existen diversas posibilidades para esto se darán preferentemente aquellas que relacionan ácidos fuertes con bases fuertes y ácidos débiles, con bases débiles.

Cuando los productos de corrosión ya no varían en el tiempo esto representa que la velocidad de disolución y reformación está en equilibrio, entonces éstos alcanzan un espesor constante. El tiempo requerido para lograr un estado estable de corrosión puede tomar varios años o hasta décadas. Esta transformación gradual concuerda con la observación común de que los productos de corrosión formados luego de una exposición atmosférica muy prolongada son similares, y en algunos casos idénticos a los minerales formados como resultado de procesos naturales de larga duración.

Por otra parte, existe evidencia del efecto que, en los procesos de corrosión atmosférica, tiene la luz solar (fotosensibilidad). De trabajos experimentales se ha demostrado [22] que la velocidad de corrosión se acelera en niveles aún superiores al 50%, para exposiciones prolongadas ante la presencia de luz solar. Este efecto se considera que está relacionado con la interacción de fotones con los óxidos semiconductores (creación de pares de electrón-sitio vacante) en la superficie de corrosión.

La nucleación de los productos de corrosión se facilita con la naturaleza heterogénea de la superficie del sustrato, en particular por defectos de estado sólido que pueden actuar como sitios de nucleación. La velocidad general de formación de los precipitados, por lo tanto, está limitada por la tasa de crecimiento más que por la de nucleación, de esto se concluye que existirán muchos núcleos pequeños de precipitados en vez de pocos núcleos grandes, situación que es congruente con la evidencia experimental, la cual indica que la formación de óxido se presenta en muy diversos lugares de la superficie metálica.

Después de una exposición prolongada, el tamaño y número de núcleos de precipitados aumentan hasta un punto en que cubrirán por completo la superficie metálica coloreándola en algunos casos y haciéndola así visible al ojo humano tal como para el cobre, hierro y zinc o indetectable para éste como es el caso del aluminio y acero inoxidable.

Cuando la capa de productos de corrosión se ha formado y cubre la superficie es necesario que las especies reactivas se transfieran de la fase líquida al interior de la sólida, o que los iones metálicos se transporten hacia el exterior (figura 2.5); o en su defecto que ambos fenómenos de transporte se den simultáneamente. En general, los iones hidrógeno, y los cationes de valencia -1 como los de cloro son transportados más fácilmente a través de los productos de corrosión que especies como los iones sulfato. Si la capa de productos de corrosión es porosa o delgada, el transporte de iones no es impedido de manera significativa y tiene una habilidad protectora muy pobre. Las capas de productos de corrosión más densas y gruesas brindan una mayor resistencia a la corrosión al restringir el transporte de iones.

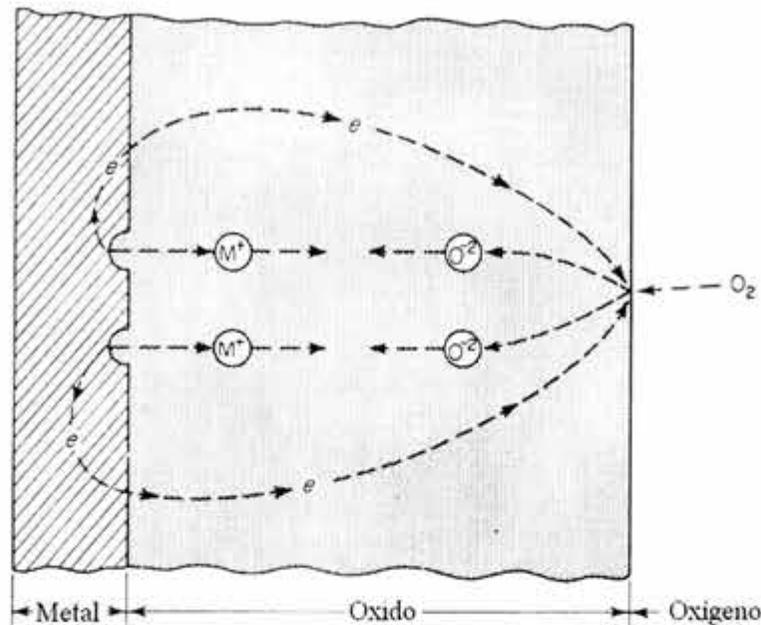


Figura 2.5 Mecanismos de transporte a través del depósito de corrosión que se ha formado.

Además del transporte de iones, se debe considerar el transporte de electrones entre las regiones anódicas y catódicas; este es un proceso necesario para poder cerrar el ciclo oxidación-reducción y cualquier interrupción o limitación afectará al proceso corrosivo. Mientras el sustrato metálico está cubierto con una capa delgada de óxido, el transporte de electrones a través de esa capa no es un proceso que limite la velocidad, sin embargo, cuando la capa aumenta su espesor, siendo su conductividad baja, se verá afectada la velocidad del fenómeno corrosivo.

El crecimiento de largo plazo de los productos de corrosión depende de las condiciones de exposición. Cuando ésta se caracteriza por variaciones diarias en la humedad relativa y en el espesor de la capa líquida, el desarrollo de la capa de productos de corrosión tiene una secuencia por etapas. La primera ocurre durante el incremento en el espesor de la capa líquida cuando parte de los productos de corrosión pueden disolverse. La segunda etapa incluye la coordinación en la capa líquida de aniones metálicos y cationes disueltos mientras que la última se da en la reducción del espesor de la capa cuando los pares iónicos nuevamente coordinados se vuelven a precipitar. Los ciclos de disolución-coordinación-precipitación causan continuamente que la capa de productos de corrosión envejezca cambiando su composición química, microestructura, cristalinidad, espesor y propiedades.

Otro cambio en las características de los productos de corrosión durante la exposición prolongada es su transformación gradual del estado amorfo a uno cuasicristalino o cristalino.

De todo lo expuesto se concluye que existen diferencias de tiempo muy importantes en las diferentes etapas que se presentan durante la corrosión atmosférica, ya que mientras las etapas iniciales requieren de intervalos del orden de segundos para que se alcancen condiciones de estabilidad, el depósito puede requerir de periodos de hasta décadas para obtener la misma condición.

2.4 NECESIDAD DE UNA PERSPECTIVA MULTIFASE PARA EL ESTUDIO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

Dado que la corrosión atmosférica se produce a través de una serie de reacciones químicas generadas en el seno de la película de agua (en ocasiones de solo unas decenas de nanómetros de espesor) que cubre la superficie del sólido (metal), resulta entonces de particular importancia conocer las características de las reacciones que en ésta se presentan.

El espesor de la capa es fundamental en la determinación de las reacciones, siendo claro que en el caso de capas de gran espesor la descripción es análoga a la empleada cuando el material está inmerso en el electrolito. En el caso de las situaciones características de la corrosión atmosférica cuando las superficies están recubiertas por capas de unas cuantas moléculas de agua de espesor las condiciones son diferentes ya que las características del electrolito variarán en el tiempo. En particular, existe evidencia que, en el escenario común de un ciclo de secado y mojado de una superficie, situación normal en la corrosión atmosférica, las reacciones de mayor interés se producen cuando la capa acuosa es delgada y las concentraciones de electrolitos son elevadas.

A través de trabajos experimentales se ha demostrado la existencia de capas de depósito de humedad (de unas cuantas moléculas de agua de espesor) sobre las superficies metálicas aún para humedades relativas menores al 40%, esto a temperatura ambiente (298 °K). El espesor de la capa formada dependerá de las características de la superficie (composición, porosidad, textura, grado de oxidación), de la humedad y de la temperatura principalmente.

Por otra parte se considera que las superficies metálicas expuestas a la precipitación del agua (lluvia, nieve, niebla o rocío) presentan capas con un espesor suficiente para considerar condiciones prácticamente equivalentes a las de inmersión.

Al considerar la capa de agua y por ende su comportamiento se deberá tomar en cuenta que ésta no existe en aislamiento ya que se presenta interacción entre sus diversas formas y los procesos de formación de depósitos. En general se definen seis estados que interactúan en el fenómeno (figura 2.6) G(gaseoso), I(interfase), L(líquido), D(capa de depósito), E(régimen de transferencia de carga) y S(sólido), por lo que los modelos para estos sistemas reciben el nombre de GILDES [23].

Para los seis estados, se han desarrollado expresiones matemáticas a través de las cuales se pretende describir las reacciones y transformaciones que se presentan. Estos desarrollos han requerido la acción multidisciplinaria (química de la atmósfera; transporte de masa en interfases, química de capas líquidas- agua-, química de depósitos de capa coloidal ciencia de superficies; electroquímica y química de estado sólido).

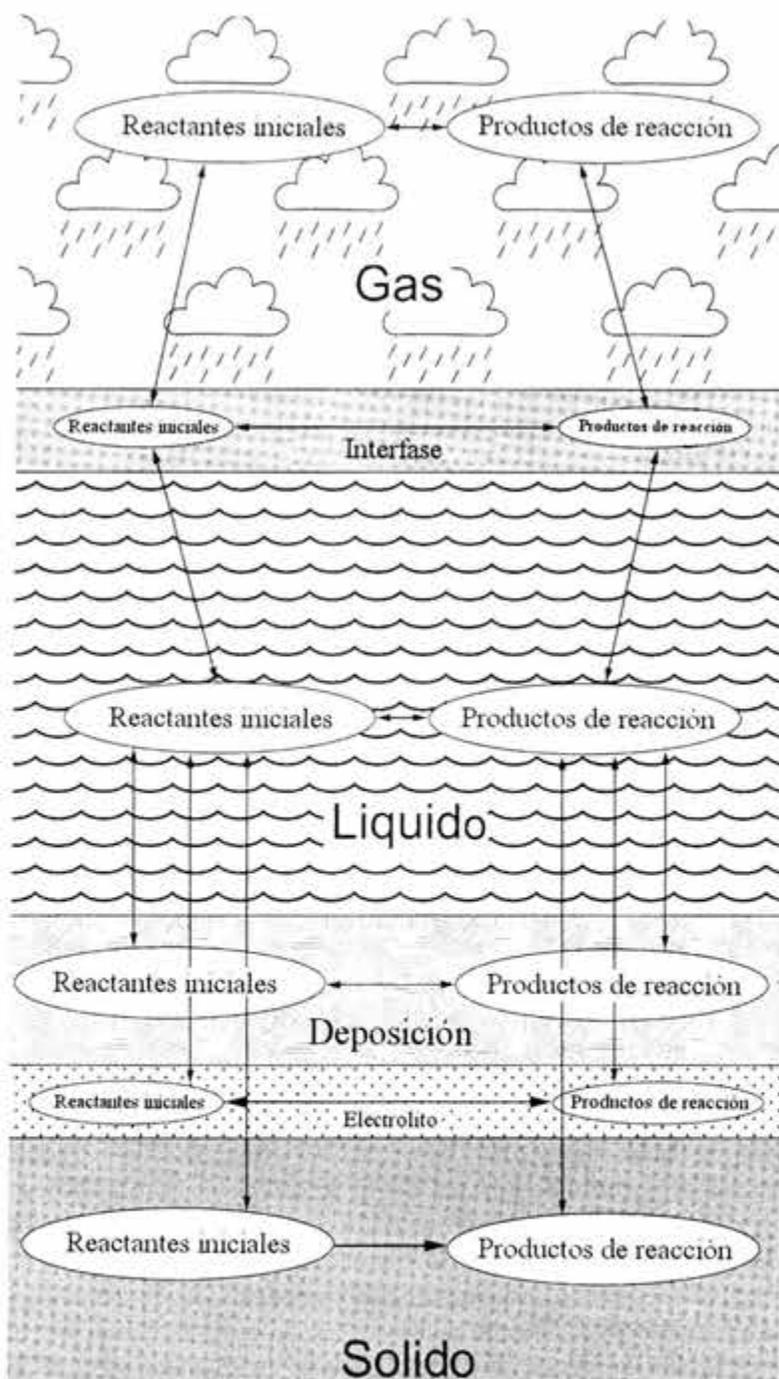


Figura 2.6 Regímenes, transiciones y transformaciones que requieren ser consideradas en el análisis de la química de la corrosión atmosférica (seis etapas de la corrosión atmosférica)

En lo que se refiere a la interfase se debe considerar que las moléculas en fase gaseosa que participan en las reacciones químicas de la superficie húmeda, antes de esa interacción, deben cruzar la interfase líquido-gas.

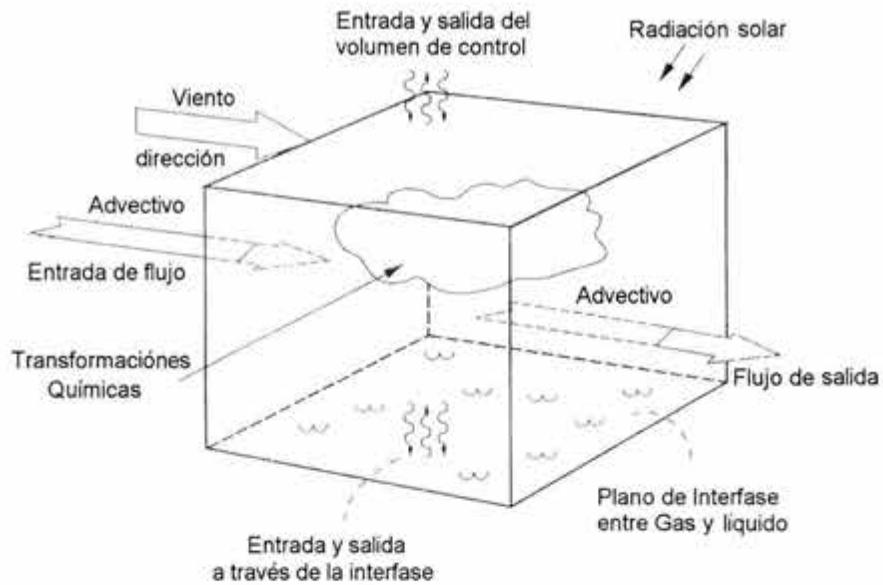


Figura 2.7 Elementos básicos del régimen gaseoso durante la corrosión atmosférica [20]

Por su parte la fase líquida recibe especies reactivas de la fase gaseosa y volatiliza especies hacia ésta. La fase líquida se asemeja a la fase gaseosa en cuanto a que para la descripción de sus procesos químicos requiere la solución simultánea de un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales tales como la ecuación 2.4. Las transformaciones están influenciadas por el transporte de especies desde los regímenes gaseoso y sólido hacia la solución (figura 2.8).

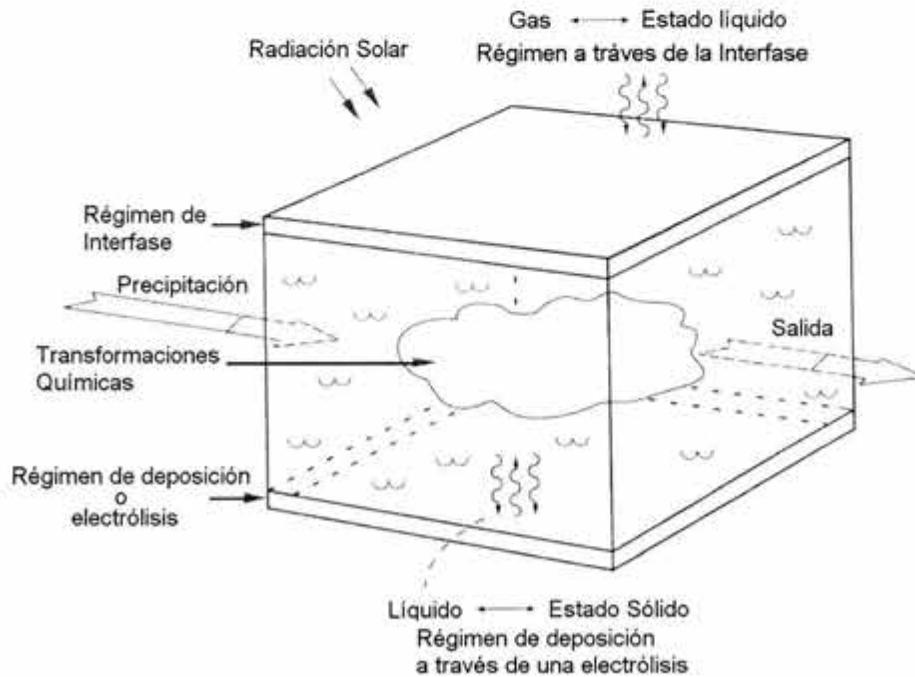


Figura 2.8 Elementos que intervienen en el régimen líquido durante la corrosión atmosférica [20]

Muchos de los datos y modelos teóricos disponibles para estudios de la cinética de reacciones químicas en soluciones acuosas se refieren a condiciones de alta concentración, sin embargo en condiciones de capa delgada en contacto con la atmósfera ocurren bajo fuerzas iónicas (μ) de gran intensidad.

Para el caso del agua de lluvia ésta se encuentra en el umbral de efecto de las fuerzas iónicas (figura 2.9). Durante los ciclos de mojado-evaporación (secado de la superficie) se presentan cambios de varios órdenes de magnitud en las fuerzas iónicas al pasar de condiciones de reacción equivalentes a la inmersión (película gruesa) a las de capa delgada.

Como consecuencia de las elevadas fuerzas iónicas, las concentraciones de iones son reemplazadas por sus actividades en los modelos asociados, para indicar el grado al cual su concentración absoluta disminuye por apareamiento iónico y otros procesos de solución.

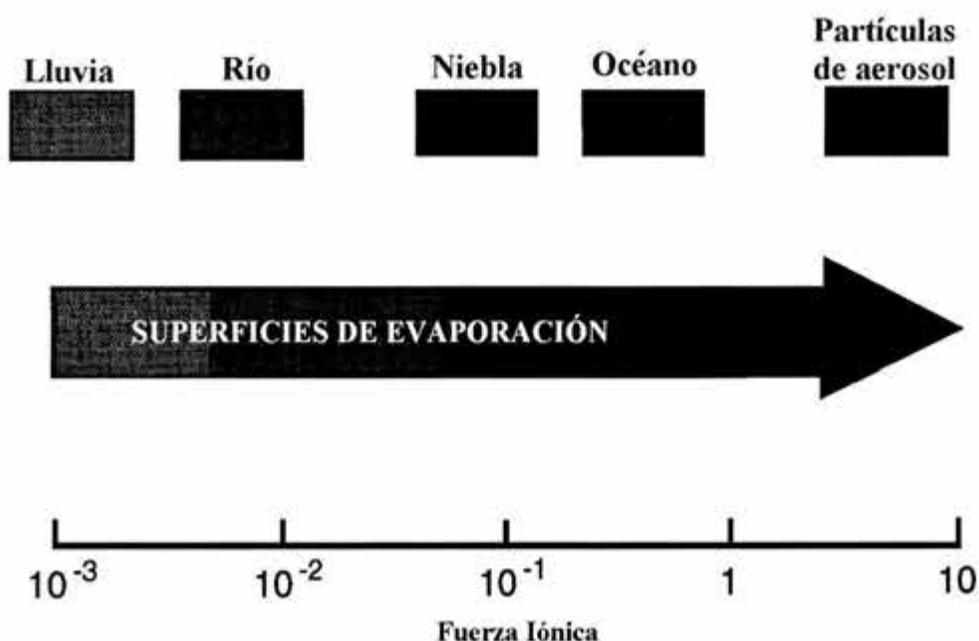


Figura 2.9 Valor comparativo de la fuerza iónica de películas de agua de diferente origen [20]

Cuando un metal se recubre con una solución acuosa sufre corrosión, formando generalmente una o más capas de depósitos, con frecuencia hidróxidos. La velocidad de cristalización está controlada por transporte y condiciones de la superficie.

Una vez que una capa de productos de corrosión se forma en una superficie puede quedar atrapada una fracción de la solución la cual se define como electrolito interno, toda interacción subsiguiente entre la superficie y la solución electrolítica exterior requiere que las especies reactivas pasen primero a través de la capa de depósito y que los productos de disolución se transporten al exterior. Para esto las capas de depósito se pueden modelar como membranas, ya que no todos los iones son transportados a través de las membranas con la misma eficiencia. Normalmente, los iones con carga unitaria y pequeñas dimensiones, enfrentan menor resistencia

que los iones con carga múltiple. Algunas capas de corrosión formadas naturalmente son fuertes inhibidores del transporte iónico, y son denominadas “capas pasivantes”. Otros son menos que membranas perfectas y transportan iones, como el sulfato, con relativa facilidad.

La presencia de una superficie conductora o semiconductor en vez de una aislante modifica las condiciones de reacción que han sido anteriormente enunciadas, ya que las superficies de estos sólidos están cargadas, y la magnitud y polaridad de la carga están en función de las propiedades tanto del sólido como de la solución. Los iones en el electrolito son atraídos preferencialmente por la carga de la superficie y forman una capa protectora con propiedades químicas y físicas distintas a las de electrolito puro. Esta capa superficial influye en la química y el transporte dentro del conjunto del sistema multifase.

Cuando dos superficies distintas están presentes, una dominada por reacciones anódicas y la otra por reacciones catódicas, se forma una celda de corrosión donde el electrolito puede funcionar como una porción de un circuito eléctrico. La tasa de electrones que se incorporan o abandonan la fase líquida de una celda de corrosión (moles por unidad de área y de tiempo) está especificada por una ecuación de Butler-Volmer de la forma:

$$R = KCa^+ \left[\exp\left(\frac{\alpha_a \eta F}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c \eta F}{RT}\right) \right] \quad (2.5)$$

Donde α representa el coeficiente de transferencia de carga, F es la constante de Faraday, K es la constante de velocidad para la transferencia de carga de la superficie a la solución, C_a^+ es la concentración de iones A^+ en la solución y η es el sobrepotencial.

La ecuación 2.5 se convierte a una forma más común utilizada en electroquímica al multiplicarla por la constante de Faraday, quedando:

$$i_c = KFCa^+ \left[\exp\left(\frac{\alpha_a \eta F}{RT}\right) - \exp\left(\frac{-\alpha_c \eta F}{RT}\right) \right] \quad (2.6)$$

Donde i_c es la densidad de corriente de electrodo (amper/unidad de área).

En el modelo GILDES [23] el comportamiento de los sólidos se incorpora como consecuencia del ataque de los constituyentes de la fase líquida sobre éstos, y su subsiguiente disolución. La velocidad de disolución es en general, dependiente de la concentración de iones hidrógeno:

En la etapa inicial de la disolución superficial asistida por iones hidrógeno, los enlaces M-O se polarizan por la anexión rápida de los iones hidrógeno a grupos superficiales OH^- . El ión metálico posteriormente se desliga de la superficie en sitios selectivos, definidos en función de su energía.

Lo expuesto permite constatar la complejidad del análisis de los procesos que se llevan a efecto durante el proceso de corrosión atmosférica, situación que a su vez sugiere la razón por la cual la orientación de los estudios al respecto ha sido experimental más que teórica. Por último es

conveniente comentar que si bien los procesos que dan lugar al fenómeno de la corrosión atmosférica son muy complejos, y no necesariamente han sido totalmente comprendidos a la fecha, existen los suficientes fundamentos teóricos al respecto, situación a la que se suman los trabajos que continuamente se publican con relación a estos temas, los cuales sin duda permitirán construir una imagen completa de los fenómenos que dan lugar a la corrosión atmosférica y pasar así de una visión meramente empírica y experimental que dominó durante el siglo XX a una comprensión y modelado teórico ya en el siglo XXI.

2.5 EFECTO DE LOS GASES ATMOSFÉRICOS EN LA CORROSIÓN

A la fecha se han identificado del orden de 2000 distintas especies químicas como gases atmosféricos o como constituyentes de las partículas que se encuentran en suspensión. Los fenómenos de tipo fotoquímico son en general de importancia para explicar las transformaciones que se producen en los diversos constituyentes atmosféricos. Afortunadamente solo algunas de las especies gaseosas que existen comúnmente en la atmósfera tienen efecto desde el punto de vista corrosivo, en particular ocho gases son los de mayor influencia (CO_2 , O_3 , NH_3 , NO_2 , H_2S , SO_2 , HCl , ácidos orgánicos).

Bióxido de carbono

Se trata de un constituyente normal de la atmósfera. Es absorbido por los vegetales como parte del proceso de fotosíntesis, sobre todo en la época de crecimiento de los vegetales (primavera), para luego ser devuelto a la atmósfera durante el decaimiento de la vegetación (otoño). Una situación cíclica similar ocurre con los océanos, ya que éstos absorben el CO_2 en condiciones de baja temperatura y lo retornan al calentarse.

Las actividades desarrolladas por el hombre representan tan solo un 3% del total generado. Sin embargo esta cantidad está fuera del equilibrio, esto es, no existen sumideros suficientes para que se neutralice. La mayor parte del CO_2 , producto de actividades antropogénicas, es generado por procesos de combustión.

Se trata de un gas de baja reactividad con una elevada duración en la atmósfera, además de ser un promotor del efecto invernadero (en los últimos 40 años su concentración se ha incrementado en forma regular del orden de 0.5 % anual). Su incremento no influye, de manera significativa en la agresividad del ambiente, ya que el ácido carbónico se clasifica como débil.

La generación de este gas se concentra en los países industrializados como son la Comunidad Económica Europea, los EUA y Japón.

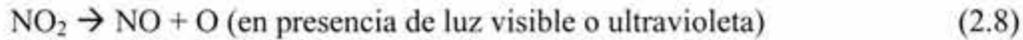
En últimas fechas ha alcanzando una concentración promedio del orden de 355 ppm, donde en zonas urbanas puede alcanzar hasta 600 ppm. Si bien es débilmente soluble en agua puede ser absorbido por cualquier cuerpo de agua (gotas, película o sistema de grandes dimensiones), lo que da lugar a la formación del ión carbonato (CO_3)²⁻.



Su asimilación por el agua de lluvia modifica la acidez de ésta a un pH del orden de 5.6.

Ozono

Es uno de los iniciadores de las transformaciones gaseosas junto con el radical hidróxido. El ozono es un producto de la fotoquímica atmosférica, su fuente dominante es la fotólisis del dióxido de nitrógeno [24]:



El ozono es asimismo muy sensitivo a la radiación ultravioleta de tal forma que puede dar lugar a un átomo de oxígeno que al combinarse con una molécula de agua forma radicales hidróxido:



El hidroxilo es el reactivo más vigoroso en la atmósfera, de lo que se deriva el efecto del ozono en la agresividad del ambiente. Éste por si es menos activo que el OH^\cdot , además de no ser soluble en agua, sin embargo pequeñas cantidades de O_3 pueden disolverse en gotas o capas de agua de tal forma que se dé lugar a las reacciones antes expuestas. Su concentración generalmente es del orden de 100ppb.

Está relacionado con las emisiones de NO_x y compuestos volátiles de carbono (producto de la combustión). En regiones que combinan un elevado tránsito urbano a la vez de ser soleadas su concentración se ha incrementado de un 200 a 300% de 1975 a la fecha.

Se ha determinado que en interiores la presencia de compuestos orgánicos volátiles (VOC'S) decrece en presencia del ozono [25], lo anterior mientras compuestos no volátiles del tipo de los aldehídos se incrementa, esto sobre todo para concentraciones de 28 a 44 ppb.

Asimismo estudios experimentales han demostrado [26] que en presencia de SO_2 actúa como un acelerador de la corrosión en el cobre.

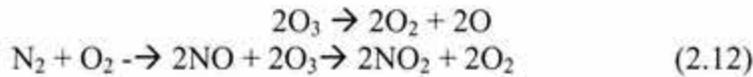
Amoniaco

Es el único gas atmosférico de carácter básico, razón por la que neutraliza a los componentes ácidos. Tanto los ecosistemas como el mar emiten este gas, sin embargo su ciclo global está dominado por las fuentes antropogénicas. Su fuente principal es la agricultura y los excrementos animales así como la combustión de biomasa (quema de pastos y de bosques para abrirlos al cultivo).

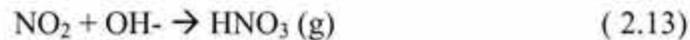
El NH_3 se caracteriza por ser muy soluble en el agua, por lo que se puede presentar como depósito húmedo, y al combinarse con el $(\text{SO}_4)^{2-}$ da lugar al sulfato de amonio $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$. La elevada solubilidad del amoniaco da lugar a importantes variaciones de su concentración en atmósfera, ya que en áreas urbanas puede variar de 1 hasta 50 ppb.

Óxidos de Nitrógeno

Se han desarrollado un amplio número de trabajos de investigación relacionados al efecto de los óxidos de nitrógeno en la corrosión atmosférica, sobre todo de acero, cobre y zinc [27]. Su fuente principal la representan los procesos de combustión a elevadas temperaturas, durante los cuales el NO_x es formado, siendo rápidamente oxidado en presencia de O_3 .



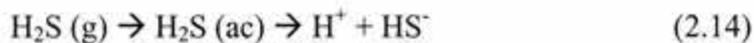
Dado que las fuentes principales del NO_2 son las mismas que para el CO_2 (combustión), su distribución geográfica es coincidente, encontrándose las mayores concentraciones en las áreas altamente industrializadas (Sudeste asiático, Europa y Norteamérica). En estas áreas urbanas la concentración de NO_2 puede alcanzar los 300ppb durante periodos de smog fotoquímico intenso. El dióxido de nitrógeno es prácticamente insoluble en el agua, por lo que no es precipitado a través de gotas, rocío o películas de agua que se formen en las superficies, el único sumidero lo representa la reacción con el radical OH^\cdot para formar ácido nítrico.



Desde el punto de vista del deterioro de equipo electrónico es conveniente recordar que éste acelera la corrosión del cobre, plata y afecta al oro.

Ácido sulfhídrico.

Se trata de un producto de la degradación anaeróbica de los componentes orgánicos de azufre. Sus fuentes por tanto son naturales o debidas a la combustión de hidrocarburos y fabricación de papel entre otras. Se trata de un compuesto ligeramente soluble en agua, de acuerdo a:

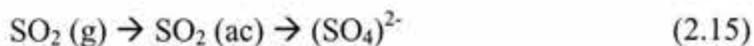


Donde el ión HS^- es un agente corrosivo activo.

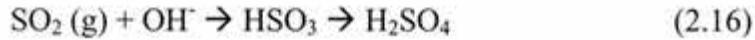
Óxidos de Azufre

Se trata de los gases más importantes para la corrosión atmosférica (se generan durante la combustión y en la refinación de piritas). Su control es factible desde el punto de vista tecnológico por lo que se han limitado sus emisiones sobre todo en países altamente industrializados, por otra parte su concentración se ha venido incrementando en regiones de rápida industrialización con nulos o reducidos controles en las emisiones (economías emergentes o países en vías de desarrollo). Su concentración varía sensiblemente de región a región y aún dentro de una misma zona urbana.

El dióxido de azufre es moderadamente soluble en agua, de acuerdo a:



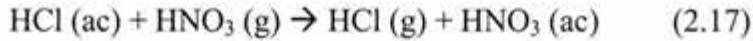
De manera similar cuando se deposita en una superficie reacciona con el radical OH^\cdot (en fase gaseosa), formando así H_2SO_4 :



El ácido sulfúrico se disuelve en el agua en donde se disocia en forma iónica.

Ácido Clorhídrico

Se origina en la brisa marina de la cual se libera por la presencia de ácidos fuertes:



Este ácido presenta una solubilidad similar al nítrico por lo que tiende a disolverse con relativa facilidad en las gotas o en películas superficiales o aún en el rocío, disociándose para formar ión cloro el cual es un agente corrosivo activo.



Ácidos orgánicos

Los más comunes (fórmico HCOOH y acético CH_3COOH) son corrosivos a la mayoría de los metales industriales. Sus fuentes principales son la combustión incompleta de madera, de vegetación en general y las reacciones fotoquímicas del *smog*. No existen datos de su concentración y distribución, se considera que en áreas urbanas alcanzan valores de 1 a 10 ppb. Son altamente solubles en agua, en donde se disuelven parcialmente.

Comentarios finales

En general se concluye la diversidad de efectos de los principales contaminantes presentes en la atmósfera, su amplio rango de variación en función de sus fuentes y sumideros particulares, y el efecto que la actividad humana tiene en su presencia.

Por último es necesario considerar que para que la corrosión atmosférica se produzca se requiere que las especies corrosivas tengan contacto con las superficies, por lo que es fundamental determinar la rapidez de flujo vertical que éstas puedan presentar. En general se considera que dicha velocidad es función de la concentración de cada contaminante y de las condiciones atmosféricas, asimismo la eficiencia en el depósito dependerá de su solubilidad en agua, dado el efecto fundamental de ésta.

2.6 EFECTO DE LAS PARTÍCULAS

La dinámica, composición y comportamiento de las partículas (líquidas o sólidas) que se encuentran en suspensión en la atmósfera (aerosol) es un problema complejo, sin embargo es necesario conocer su comportamiento en virtud del efecto que éstas, una vez depositadas en la superficie, tienen en la velocidad de corrosión. Las partículas se producen por la condensación de gases de baja volatilidad seguida de coalescencia (figura 2.10) o por efectos mecánicos (partículas de grandes dimensiones).

Al igual que con los gases las partículas se depositan cuando entran en contacto y son retenidas por la superficie (depósito seco). A diferencia de los gases las partículas presentan un efecto por dimensiones donde las más pequeñas tienen una mayor susceptibilidad al movimiento del aire, mientras que las de gran tamaño no dependen tanto de este factor. Lo anterior se traduce en diferencias en la velocidad de depósito, por efecto de tamaño, de hasta dos órdenes de magnitud. Las mínimas velocidades de depósito se presentan para partículas del orden de 0.1μ de diámetro.

De acuerdo a su génesis las partículas pueden ser producto de la condensación de compuestos gaseosos o producirse por medios mecánicos.

Las partículas formadas por la condensación de diversos compuestos se caracterizan por una composición mixta debido a que éstas se forman en un proceso progresivo a partir de diferentes especies.

Las partículas desde el punto de vista de su origen se clasifican en:

- i. Naturales, por ejemplo sales provenientes del océano, polvos del suelo, polvos de origen volcánico.
- ii. Antropogénicas; tráfico vehicular, actividades de la construcción, combustión de biomasa, actividades industriales.

Las partículas gruesas de origen natural tienen un mayor impacto a nivel global que las antropogénicas, ya que éstas solo tienen importancia a nivel local.

Una de las características de las partículas que más influye en su efecto sobre el deterioro de las superficies metálicas, sobre las cuales se depositan, es su comportamiento higroscópico, transformándose así de sólidos a gotas con una elevada concentración de contaminantes [28]. Además por efecto de la humedad absorbida éstas incrementan su diámetro; por ejemplo a una humedad relativa del 90% una partícula atmosférica típica puede incrementar su radio en un 50%, lo que significa un 300% en volumen.

La determinación de la composición de las partículas atmosféricas, hasta mediados de los años 1990's se realizaba tomando una gran cantidad de éstas para así determinar su composición promedio. De diez años a la fecha se han aplicado técnicas de fragmentación con láser seguido por análisis espectroscópico de masa. A partir del empleo de dichas técnicas se ha podido constatar que su composición no es homogénea, lo cual a su vez permite definir los mecanismos a través de los cuales se da lugar a su formación (figura 2.12). La composición de las partículas es diferente en función del medio ambiente y de su origen.

Su carácter higroscópico modifica las condiciones de las superficies sobre las cuales se depositan, de tal forma que si las partículas están distribuidas en la superficie, pueden dar lugar a capas de varios cientos o miles de moléculas de agua de espesor, situación que modifica sensiblemente la química de las reacciones, de una película de pequeño espesor a química de capa gruesa, condición a la que habrá que adicionar la concentración de las especies corrosivas en el electrolito.

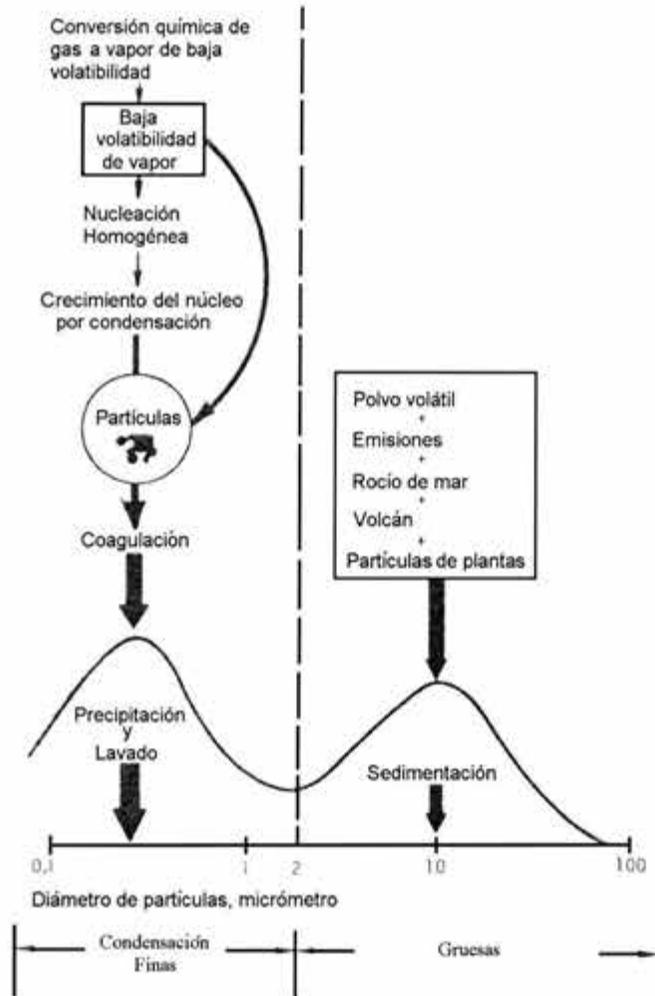


Figura 2.10 Mecanismo de formación y distribución de tamaños de aerosoles atmosféricos provenientes de diferentes fuentes [20].

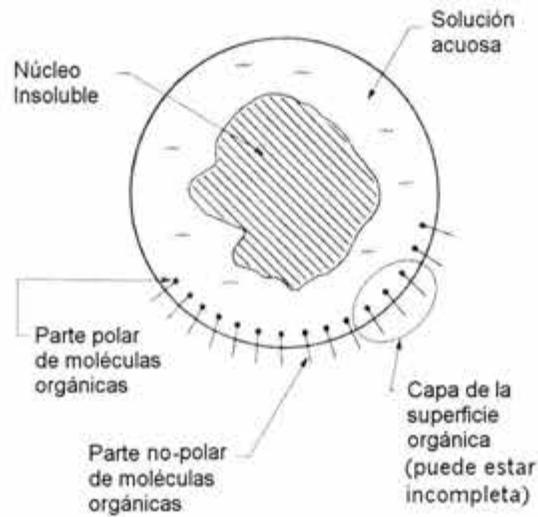


Figura 2.11 Partícula recubierta por una película de origen orgánico

2.7 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La cinética de la corrosión está íntimamente ligada con la temperatura, por lo que se considera que cuando ésta se incrementa la velocidad de corrosión también lo hace. En el caso de la corrosión atmosférica se presentan características particulares, dado que los rangos de variación de dicho parámetro están muy limitados. Por otra parte la temperatura influye en forma directa con la posibilidad de que se presente una película de agua sobre la superficie, así como también en el espesor de ésta. Por último temperaturas ambientales por debajo de los 0 °C se considera que dan lugar a la congelación de la película y por consecuencia a la imposibilidad de que los procesos electroquímicos continúen.

En el caso de atmósferas interiores, cuando se cuenta con sistemas de acondicionamiento de aire, se pueden presentar problemas si los sistemas no cuentan con deshumidificadores, ya que al enfriar el aire (sin eliminar la humedad) se incrementa la humedad relativa, todo lo cual se traduce en un incremento de la agresividad del ambiente.

2.8 MAPAS DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA

La necesidad de una descripción cuantitativa de la corrosividad del ambiente ha dado lugar a la integración de mapas de corrosión. Para este caso existen muy diversos métodos, basados en general en la exposición de probetas patrón durante periodos prolongados o mediante datos climáticos. Por ejemplo se han desarrollado mapas de corrosividad para carrocerías de automóviles [29] basados en el deterioro de probetas patrón colocadas en la parte inferior de la carrocería de vehículos cuyo desplazamiento es monitoreado. Dichas probetas son retiradas después de periodos de tiempo predeterminados, posteriormente es analizado el deterioro sufrido (pérdida de masa, presencia de picaduras, densidad de éstas, etc.), para con estos datos definir el correspondiente mapa de agresividad del medio.

Los estudios de corrosividad atmosférica, a nivel mundial, han tenido un gran desarrollo a partir de los años 1980's y se han traducido en un conocimiento más profundo de los fenómenos que se suscitan, además de permitir la definición de la agresividad de las diversas regiones geográficas, esto mediante varias metodologías, de las cuales la propuesta por la Internacional Standard Organization –ISO- (normas 9223:1992(E), 9224:1992, 9225:1992, 9226:1992) es la que en la mayoría de los casos se ha empleado.

La clasificación ISO [30, 31, 32, 33] para corrosividad atmosférica se basa fundamentalmente en parámetros atmosféricos a través de los cuales se determina el tiempo de humectación (tabla 2.1), dato que se combina con los niveles de los contaminantes presentes (bióxido de azufre y cloruros, tablas 2.2 y 2.3), para esto es necesario tener en cuenta:

1. Las características del clima (temperaturas, precipitación, vientos). A través de las cuales se define el tiempo de humectación.
2. La concentración de los contaminantes, principalmente bióxido de azufre y cloruros. Si bien la normatividad propuesta por ISO solamente considera éstos es necesario tener en cuenta que existen otros que en menor medida también afectan la velocidad de corrosión (NO_x , H_2S , CO_2) o favorecen las reacciones (O_3) con una sensible influencia en el deterioro de los metales y aleaciones.

Tabla 2.1 Clasificación del tiempo de humectación de acuerdo con las condiciones climáticas (ISO 9223, Classification of the Corrosivity of Atmospheres) [30].

Categoría	Porcentaje del tiempo de humectación	Horas de humectación por año	Características típicas del ambiente
T ₁	Menor al 0.1%	Menor de 10	Ambiente interior con control automático de clima
T ₂	0.1 a 3	10 a 250	Interior sin control automático de clima.
T ₃	3 a 30	250 a 2500	Exterior seco y frío
T ₄	30 a 60	2500 a 5500	Exterior, otros climas
T ₅	Mayor a 60	Mayor a 5500	Climas húmedos

Tabla 2.2 Clasificación del nivel de contaminación de la atmósfera por cloruros, basada en la velocidad de depósito (ISO 9223) [30]

Categoría	Velocidad de depósito en mg/ m ² - día
S ₀	Menor de 3
S ₁	4 a 60
S ₂	61 a 300
S ₃	301 a 1500

Tabla 2.3 Clasificación de la contaminación de acuerdo con la concentración de SO₂ (ISO 9223) [30]

Categoría	Velocidad de depósito de SO ₂ mg/dm ² -día
P ₀	Menor de 10
P ₁	11 a 35
P ₂	36 a 80
P ₃	81 a 200

Tabla 2.4. Categorías de corrosividad de la atmósfera de acuerdo con ISO 9223 [30].

Tiempo de humectación	Cl	SO ₂	Acero	Cu y Zn	Al
T ₁	S ₀ o S ₁	P ₁	1	1	1
		P ₂	1	1	1
		P ₃	1-2	1	1
	S ₂	P ₁	1	1	2
		P ₂	1	1	2
		P ₃	1-2	1-2	2-3
	S ₃	P ₁	1-2	1	2
		P ₂	1-2	1-2	2-3
		P ₃	2	2	3
T ₂	S ₀ o S ₁	P ₁	1	1	1
		P ₂	1-2	1-2	1-2
		P ₃	2	2	3-4
	S ₂	P ₁	2	1-2	2-3
		P ₂	2-3	2	3-4
		P ₃	3	3	4
	S ₃	P ₁	3-4	3	4
		P ₂	3-4	3	4
		P ₃	4	3-4	4
T ₃	S ₀ o S ₁	P ₁	2-3	3	3
		P ₂	3-4	3	3
		P ₃	4	3	3-4
	S ₂	P ₁	3-4	3	3-4
		P ₂	3-4	3-4	4
		P ₃	4-5	3-4	4-5
	S ₃	P ₁	4	3-4	4
		P ₂	4-5	4	4-5
		P ₃	5	4	5
T ₄	S ₀ o S ₁	P ₁	3	3	3
		P ₂	4	3-4	3-4
		P ₃	5	4-5	4-5
	S ₂	P ₁	4	4	3-4
		P ₂	4	4	4
		P ₃	5	5	5
	S ₃	P ₁	5	5	5
		P ₂	5	5	5
		P ₃	5	5	5
T ₅	S ₀ o S ₁	P ₁	3-4	3-4	4
		P ₂	4-5	4-5	4-5
		P ₃	5	5	5
	S ₂	P ₁	5	5	5
		P ₂	5	5	5
		P ₃	5	5	5
	S ₃	P ₁	5	5	5
		P ₂	5	5	5
		P ₃	5	5	5

Tabla 2.5 Velocidad de corrosión atmosférica predichas por ISO 9223 para diferentes corrosividades después de un año de exposición [30].

Categoría	Acero (g/m ² -año)	Cobre (g/m ² -año)	Aluminio (g/m ² -año)	Zinc (g/m ² -año)
C ₁	Menor de 10	Menor de 0.9	Despreciable	Menor de 0.7
C ₂	11 a 200	0.9 a 5	Menor de 0.6	0.7 a 5
C ₃	201 a 400	5 a 12	0.6 a 2	5 a 15
C ₄	401 a 650	12 a 25	2 a 5	15 a 30
C ₅	651 a 1500	25 a 50	5 a 10	30 a 60

Las normas ISO se basan en aspectos de la climatología de las regiones bajo estudio, para esto lo más usual es emplear la metodología propuesta por Köpen [9], la cual considera en su clasificación a la vegetación existente, la distribución de periodos de lluvia, precipitación, temperaturas promedio y grado de aridez de la zona (tablas 2.6, 2.7). De los cuales los que principalmente se encuentran en México corresponden a los tipos A, C y B [9].

Tabla 2.6 Clasificación del clima según Köpen [9]

Grupo	Características
A – Tropical lluvioso	Temperatura promedio mensual mayor de 18 °C. Precipitación anual superior a 750 mm
B – Clima seco	Cálidos-Temperatura media anual sobre 22°C Semicálidos-Temperatura media anual entre 18 y 22 °C Templados-Temperatura media anual entre 12 y 18 °C Semifríos-Temperatura entre 5 y 12 °C
C – Clima templado lluvioso (húmedo)	Temperatura promedio del mes más cálido superior a 18 °C. Temperatura del mes más frío superior a 0 °C.
D – Clima frío o boreal	Temperatura promedio del mes más cálido mayor a 10 °C. Temperatura promedio del mes más frío inferior a 0 °C.
E – Clima polar	Temperatura promedio del mes más cálido menor a 10 °C. Temperatura promedio del mes más frío menor a 0 °C.

Tabla 2.7 Cada uno de los tipos de clima se puede a su vez agrupar de acuerdo con las características de las precipitaciones, pudiéndose a su vez definir el tipo de vegetación [9].

Subdivisión de los tipos climáticos (letras minúsculas)	Características de las estaciones	Designación de la vegetación (letras mayúsculas)	Tipo de vegetación
F	Estación húmeda (lluvias todo el año)	B	Alta montaña
M	Estación con lluvias monzónicas (cyclones tropicales en verano)	F	Hielos permanentes
S	Estación seca en verano con lluvias en invierno	S	Estepa
W	Estación seca en invierno con lluvias en verano	T	Tundra
X	Lluvia escasa todo el año	W	Desierto

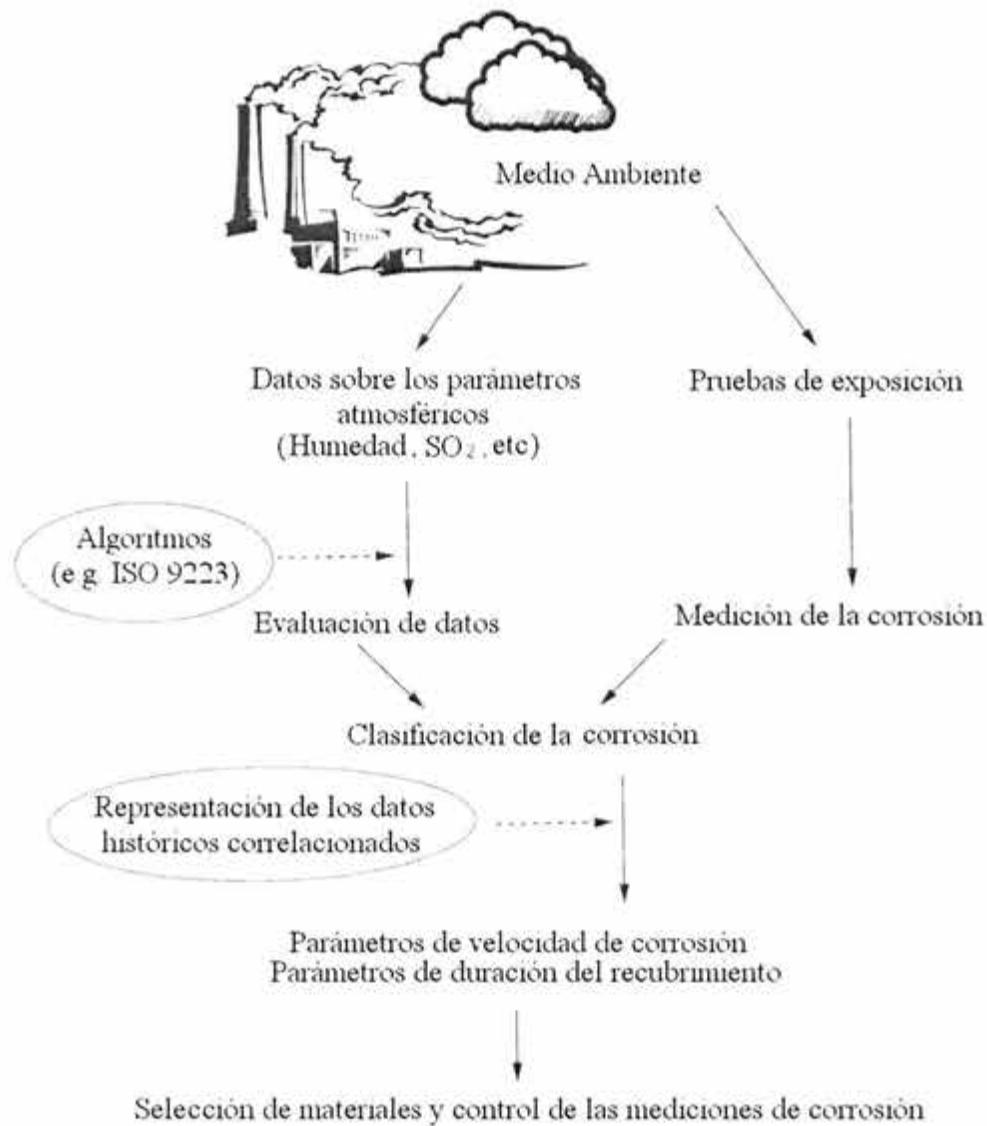


Figura 2.12 Desarrollo esquemático de dos metodologías para la definición de la corrosividad atmosférica [19].

Tabla 2.8. Efecto del clima en la corrosión atmosférica

Promedio anual		ÍNDICE		Corrosión, mm/año			
T, °C	%HR	Clima	KÖPPEN	Fe	Zn	Cu	Al
16	37	Semiárido	Bs	15.0	0.19	0.19	Desp.
16	55	Verano seco	Cs	12.6	0.27	0.97	0.06
16	59	Invierno seco	Cw	12.3	0.14	0.28	0.02
14	69	Sin estación seca	Cf	14.1	0.28	0.89	0.07
21	56	Sabana tropical	Aw	15.2	1.16	0.23	Desp.
25	84	Selva tropical	Af	15.7	0.98	0.56	0.01

Valor Variable=Desp.

Para el análisis de la corrosividad característica de una atmósfera es necesario determinar el tiempo de humectación, éste se define como el periodo durante el cual el electrolito está presente en forma evidente en la superficie del material, por consecuencia es un índice de la duración del proceso electrolítico. Con base en lo anterior el tiempo de humectación de una superficie representa el periodo durante el cual la humedad relativa es mayor o igual al 80% para una temperatura superior a 0 °C, que son las condiciones básicas para las que la corrosión es factible. Se considera, en principio, que para temperaturas inferiores a 0° C no existe corrosión debido a que la capa de electrolito se congela. Dicho concepto no es totalmente real ya que la temperatura de congelación dependerá de la concentración de sales, pudiendo existir la película de depósito en estado líquido aún a temperaturas del orden -5 °C.

Las precipitaciones pluviales afectan el tiempo de humectación dado que favorecen la formación del electrolito, pero por otra parte diluyen la concentración de contaminantes. En general en exteriores tienden a disminuir la corrosividad atmosférica (por la acción de lavado) mientras que en interiores, en el caso que no exista control de clima, tienden a incrementarla al favorecer la humectación de la superficie.

Cuando un material es expuesto a condiciones atmosféricas éstas varían dentro de ciertos intervalos, lo que a su vez provoca que las velocidades de corrosión también se modifiquen, la mayoría de las veces, en forma apreciable. Por lo tanto el deterioro se expresa como:

$$C_T = \sum v_i t_i \quad (2.20)$$

Donde C_T – Corrosión total

v_i – Corrosión característica del intervalo. La velocidad de deterioro del intervalo es función de la humedad relativa y de los contaminantes (corrosividad del ambiente).

t_i – Duración del intervalo (normalmente se define igual al tiempo de humectación).

Si bien la aplicación de las normas ISO representa un avance al proponer una metodología, ésta tiene algunos inconvenientes ya que no se considera el efecto de diversos contaminantes (NOx, sulfuros, CO₂, vapores, NH₃ sales de deshielo, entre otros). Además tan solo se orienta a 4 materiales (acero de bajo carbono, cobre, aluminio y zinc) que si bien representan la mayor proporción de materiales metálicos expuestos a la atmósfera, muy poco o nada se puede concluir a partir de los resultados de exposición para fenómenos particulares, tal como es la situación de la corrosión de equipo y dispositivos electrónicos en donde los revestimientos, las miniceldas galvánicas, el efecto de películas de pequeño espesor, entre otros, serán algunos de los tópicos de primordial importancia.

Debido a los inconvenientes de la normatividad ISO se han desarrollado algunos otros sistemas para definir la agresividad de la atmósfera. En general éstos se orientan a dar solución a problemas particulares, tal es el caso del algoritmo PACER LIME [34], (figura 2.13), clasificación desarrollada por la fuerza aérea de los EUA para la administración del mantenimiento de la estructura de los aeroplanos. A pesar de su aparente orientación ésta metodología presenta un amplio espectro de aplicación, ya que define un algoritmo de daño por corrosión que permite realizar estudios de prospectiva, para así planear las actividades de mantenimiento. Con base en su aplicación esta clasificación fue desarrollada para aluminio y sus

aleaciones, aceros, titanio y aleaciones de magnesio. Este algoritmo de daño por corrosión (ADC) considera aspectos como la distancia al mar, concentración de contaminantes y humedad del ambiente.

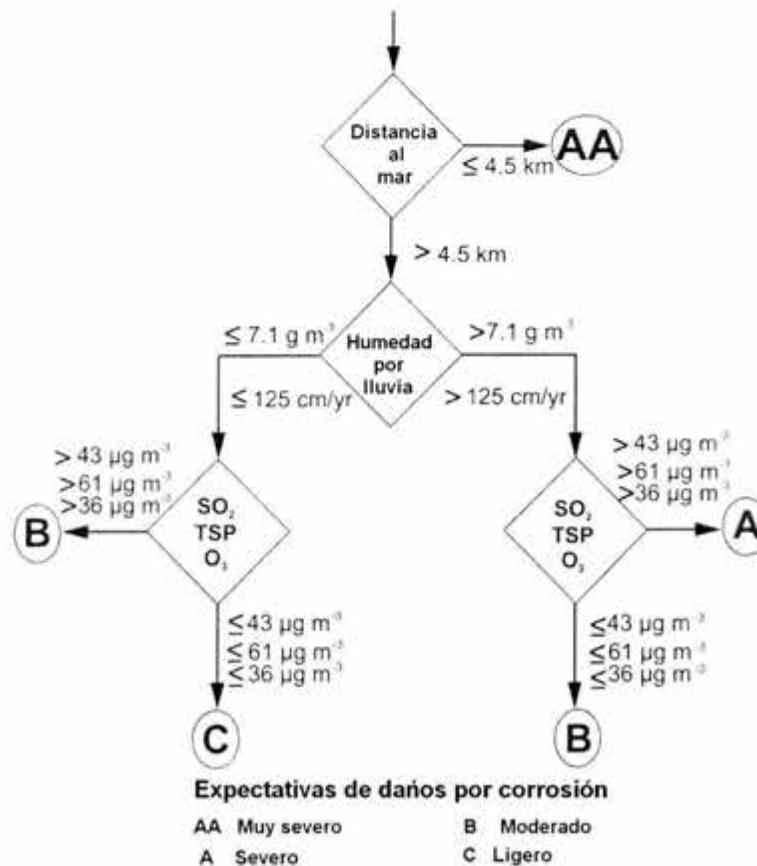


Figura 2.13 Sección del algoritmo de daño por corrosión en la cual se considera la distancia a la costa [34].

Un mecanismo alternativo para la definición de la corrosividad de un ambiente es a través de la medición directa del deterioro. Lo anterior a través de la correlación *daño-corrosividad-parámetros ambientales*.

La medida más sencilla para realizar la medición directa de la corrosión atmosférica es mediante el empleo de láminas patrón que son expuestas al ambiente para después evaluar sus pérdidas de masa, así como el número y profundidad de las picaduras. Una alternativa a la exposición de cupones de lámina es el método de alambre sobre tornillo [33], el cual requiere de menores tiempos de exposición (3 meses).

Por otra parte mediante la medición de corriente o potencial es factible la evaluación en tiempo real del daño por corrosión, para esto se emplean técnicas de Ruido Electroquímico, Resistencia Lineal de Polarización, y Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

2.9 MAPA DE CORROSIVIDAD ATMOSFÉRICA PARA LA REPÚBLICA MEXICANA

En fechas relativamente recientes se ha publicado un mapa de corrosividad para la República Mexicana [2] dentro del programa de desarrollo de un Mapa Iberoamericano de Corrosividad Atmosférica, esto bajo el auspicio del *Programa de Ciencia y Tecnología del V Centenario*.

Dicho mapa fue desarrollado empleando la metodología ISO, generada por el grupo de trabajo 4 de la comisión 156.1. Ésta se basa en la clasificación climática de Köpen (temperaturas y precipitaciones anuales y mensuales) considerando como variable fundamental el tiempo de humectación así como también el nivel de contaminantes (SO₂, Cl⁻).

Para el caso de la determinación de la corrosividad atmosférica en México es necesario considerar que el clima (figura 2.16) presenta notables variaciones ya que va desde el desértico hasta el tropical húmedo. La determinación del tipo de clima es función de la cantidad de energía solar recibida, temperatura (máximas, mínimas y promedios), humedad, precipitación, intensidad y duración de los vientos. Asimismo para México habrá que considerar la notable extensión de sus litorales (11,122km de acuerdo al INEGI), ya que si bien la mayor parte de la población se concentra en el altiplano, en la costa existen ciudades importantes, en varias de las cuales se combinan los efectos de la alta concentración de sales, típica de la costa, con la de contaminantes característicos de una intensa actividad industrial. Todo lo anterior conjugado con temperaturas anuales promedio superiores a los 18°C, situación que se traduce en prolongados tiempos de humectación y como consecuencia, elevados grados de corrosividad atmosférica.

En México, de acuerdo a lo propuesto por García [9], el grupo de climas A (tropical lluvioso con una temperatura media del mes más frío mayor a 18 °C) se extiende a lo largo de ambas costas; en la del Pacífico al sur del paralelo 24, abarcando desde nivel del mar hasta una altitud del orden de 1000 m., mientras que en el golfo es al sur del paralelo 23 a lo largo de la llanura costera. En este grupo se incluyen también algunas depresiones interiores (cuenca del Balsas y la depresión central de Chiapas).

Los climas áridos BW y BS se localizan en la parte norte del altiplano mexicano a altitudes por debajo de 1500 m., al norte del paralelo 25 en la llanura costera del Pacífico y en los litorales de la península de la Baja California.

Por su parte los climas (templados lluviosos con temperatura media del mes más frío entre -3 y 18 °C, y la del mes más caliente superior a 10 °C) corresponden a amplias zonas del territorio nacional en las zonas montañosas o llanuras en alturas comprendidas entre los 1000 y 3000 m.

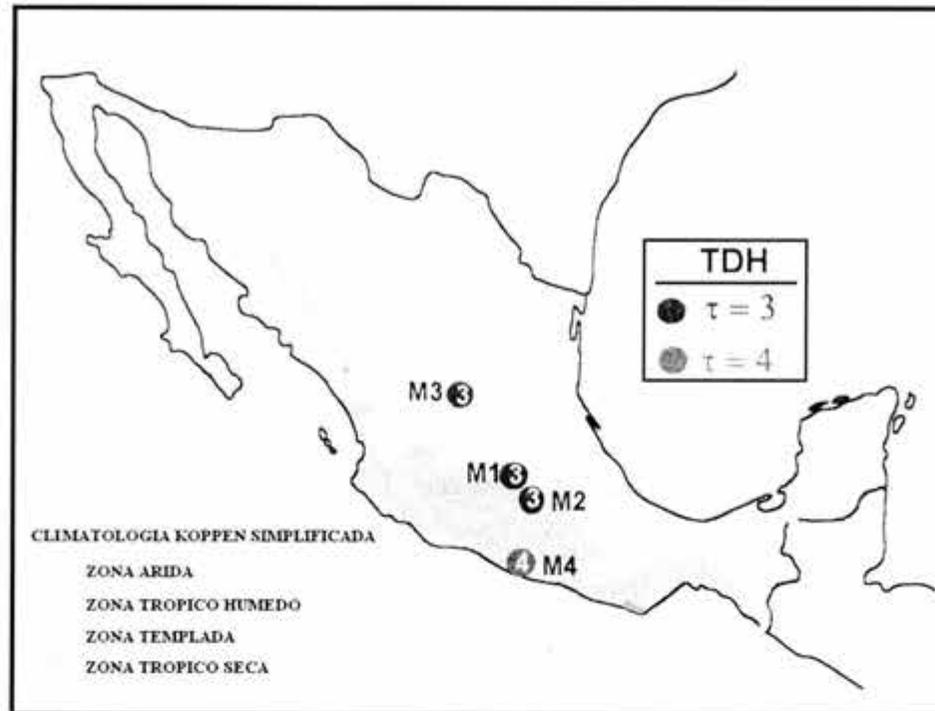


Figura 2.16 Regiones climáticas características de México [2].

2.10 CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN INTERIORES

El conocimiento acumulado sobre corrosión en interiores es mucho menor que el correspondiente a la corrosión en exteriores. El estudio de la corrosión en interiores comenzó hace aproximadamente dos décadas, y en muchas ocasiones sus resultados se han orientado al análisis de sus efectos sobre materiales y equipo electrónicos. Rice *et al* [35, 36, 37] estudiaron en 1980 la corrosión en interiores de cobre, plata, níquel, cobalto y hierro, esto para diferentes localidades en Estados Unidos. De los resultados de sus investigaciones se desprende que en general la velocidad de corrosión es mucho menor en interiores que en exteriores, sin embargo la ventaja del efecto de lavado de las superficies que se presenta en exteriores por la acción de la lluvia puede resultar benéfica al reducir la concentración de contaminantes.

Los resultados de estudios como los de Rice deben de ser tomados con las debidas reservas para países como México, en donde el empleo de sistemas de acondicionamiento de aire es poco frecuente, además de que existe usualmente un amplio intercambio de aire entre las zonas interiores de las edificaciones y el exterior. Esto da como resultado que la composición de las atmósferas exteriores sea muy similar a las interiores, con la excepción de los efectos que la lluvia y niebla tienen sobre los fenómenos corrosivos.

Por otra parte es conveniente considerar, en el caso de contar con equipos de aire acondicionado, si éstos disponen de deshumidificadores, ya que de otra manera la humedad relativa en el interior será superior al exterior.

En interiores, la película de humedad formada sobre la superficie está supeditada a ciclos de menor variación de temperatura y de humedad. Esto significa que en interiores los ciclos de condensado- evaporación son menos notorios y drásticos, si bien habrá que considerar que para que exista precipitación de condensado con efectos corrosivos, no es requisito alcanzar el punto de rocío.

Desde el punto de vista de materiales de construcción (elementos estructurales, ornamentales, herrería, etc.) las condiciones características de los interiores son poco agresivas, sin embargo para equipos y sistemas electrónicos si se dan las condiciones que permiten la presencia de inconvenientes en su funcionamiento y un sensible deterioro. Un ejemplo palpable de dicha situación es el equipo telefónico el cual se puede encontrar bajo cualquier condición atmosférica, y aún en condiciones de exteriores, como es el caso de los de servicio público.

Las posibles diferencias existentes en la concentración de contaminantes en interiores y exteriores se deben principalmente a la adsorción de gases y partículas en interiores y a la disminución de las variaciones atmosféricas exteriores por medio de sistemas de ventilación y la misma construcción. Como se observa en la tabla 2.10 la concentración general de contaminantes en interiores es menor que en exteriores a excepción del amoníaco (NH_3) y el formaldehído (HCHO). La mayor parte de los contaminantes encontrados en interiores proviene del exterior aunque algunos se producen dentro como productos de calefacción, partículas sólidas, contaminación de estufas y calentadores de gas, nieblas de aceites y grasas de las cocinas, humo de cigarrillos, descomposición de los materiales que forman pisos y paredes (tapetes, recubrimientos plásticos, etcétera), entre otros. La tabla 2.9 solo cumple funciones de comparación, ya que las concentraciones de los contaminantes varían según el ambiente y las condiciones de la edificación (existencia de sistemas de aire acondicionado, condiciones de ventilación del interior, uso del inmueble o de la zona bajo estudio, entre otros).

Tabla 2.9. Concentración general de contaminantes en interiores y exteriores.

Compuesto		Concentración (ppb)	
		Exteriores	Interiores
O_3	Ozono	4 - 42	3 - 30
H_2O_2	Agua oxigenada	10 - 30	5
SO_2	Dióxido de azufre	1 - 65	0.3 - 14
H_2S	Ácido sulfhídrico	0.7 - 24	0.1 - 0.7
NO_2	Dióxido de nitrógeno	9 - 78	1 - 29
HNO_3	Ácido nítrico	1 - 10	3
NH_3	Amoniaco	7 - 16	13 - 259
HCl	Ácido clorhídrico	0.18 - 3	0.05 - 0.18
Cl_2	Cloro	0.005 - 0.08	0.001 - 0.005
HCHO	Formaldehído	4 - 15	10
HCOOH		4 - 20	20

2.11 ALGUNOS MÉTODOS EMPLEADOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

Los métodos empleados para caracterizar el comportamiento de los diferentes materiales en presencia de la atmósfera se pueden clasificar en ensayos de campo y pruebas de laboratorio.

Ensayos de campo.- Este tipo de pruebas tiene la ventaja de exponer las muestras a las condiciones reales a las que se someten los materiales ya en servicio, pero presenta el inconveniente de requerir periodos prolongados de exposición, esto es, una hora de prueba equivale a una hora de servicio real. Dicha condición los vuelve imprácticos para efecto de control de calidad.

Si bien existen procedimientos establecidos para realizar ensayos de campo [38] en muchos casos éstos se realizan bajo consideraciones especiales, por ejemplo en los últimos años se han reportado estudios con las siguientes peculiaridades:

Fukuda y Fukushima [39] expusieron muestras de Cu y Ag (30 x 30 x 30 mm), las cuales fueron colocadas con adhesivo en paneles de acrílico (100 x 100 x 3 mm). Un total de 23 lugares fueron escogidos para la exposición de éstos testigos, los sitios se repartieron en Singapur, Bangkok, Bandung y Tokio. En cada lugar se colocaron detectores para la medición de contaminantes como H₂S, SO₂, NO₂, HCl, Cl₂; la temperatura y la humedad relativa también fueron monitoreadas en cada sitio. El tiempo de exposición de las muestras fue de 1 a 6 meses.

Tidblad y Leygraf [40] colocaron testigos en cajas de aluminio (46 x 37 x 8 cm) con 2 agujeros de 2 cm de diámetro, y estas cajas posteriormente fueron colocadas en cajas más grandes, las cuales fueron expuestas en 39 lugares representativos en Cánada, E.U.A. y Europa. En cada sitio se hicieron mediciones de SO₂, NO₂, O₃, temperatura, humedad relativa y horas de sol. Los especímenes se retiraron después de 1, 2 y 4 años de exposición.

Cordner [41] colocó muestras de aluminio, acero y acero galvanizado en 8 diferentes localidades, en cada tipo de ambiente (marino, rural e industrial). Las muestras fueron de material comercial, con las siguientes medidas: 150 x 100 x 3 mm, posteriormente se instalaron en paneles con una inclinación de 45° con respecto a la horizontal. Los paneles se colocaron en postes o superficies con una altura de 1.8 m y se les retiró después de un año.

Elshawesh, *et al* [42] realizaron estudios con alambre de acero galvanizado trenzado con aluminio, en torres colocadas a 40 metros del mar, en un área contaminada con gases (producto de la combustión de combustible ligero) y arena (soplada de un área desértica cercana). La exposición fue por un periodo de 10 años.

Zakipour *et al* [17] expusieron muestras de níquel (con una pureza mayor del 99%), en cajas de aluminio. Las medidas de las muestras fueron de 50 x 10 x 0.5 cm. Los contaminantes evaluados fueron: SO₂, NO₂, O₃, temperatura, humedad relativa, tiempo de humedad y horas de sol. Las muestras se instalaron en 39 lugares en Europa, EU y Canadá por un período de 4 años.

Vilche *et al* [43] expusieron muestras de cobre (con 99.97% de pureza), en atmósferas: marina, rural y urbana. Esto en diferentes localidades de la Argentina. Las muestras se retiraron después

de períodos de 1, 2, 3 y 4 años. Durante el tiempo de estudio se realizaron monitoreos de SO₂, Cl₂, temperatura, humedad relativa y precipitación.

Feliu y Morcillo [44] evaluaron el comportamiento de aluminio, cobre, zinc y acero. Las probetas empleadas fueron de 50 x 100 x 2 mm. La exposición se realizó en paneles, con una inclinación de 45° sobre la horizontal, esto en 71 regiones de España. La exposición duró 1 año y se hicieron mediciones de temperatura y número de días de lluvia.

Ensayos de laboratorio.- las exposiciones en laboratorio tienen por objetivo simular aceleradamente los daños ocasionados por la corrosión; esto se lleva a efecto controlando variables como la temperatura, humedad relativa, periodo de exposición, así como las soluciones utilizadas.

Es práctica común recurrir a ensayos de cámara de niebla salina [45] para intentar correlacionar los daños producidos durante la exposición atmosférica con aquellos ocasionados en esta prueba. Esto es imposible y solo deberá emplearse como una prueba de comparación (pasa no pasa), y aún en dicho caso su aplicación se restringirá a la evaluación de recubrimientos.

Existen modificaciones [45, 46, 47] en cuanto al tipo y concentración de soluciones utilizadas en esta cámara, denominándose a cada una de diversas formas:

- a) Cámara de niebla salina.
- b) Cámara de niebla salina + ácido acético.
- c) Cámara de niebla salina + SO₂.
- d) Cámara acelerada de niebla salina + Cu⁺².
- e) Cámara de ciclos de humedad.
- f) Cámara de gases.

La cámara de gases es otro equipo de laboratorio utilizado recientemente como una alternativa de prueba acelerada de corrosión. Ésta no tiene una especificación o norma, de allí que puedan encontrarse en la literatura diferentes arreglos.

Algunos ensayos de cámaras de gases, los cuales han sido reportados en los últimos años son:

Zakipour y Leygraf [16] colocaron muestras de: cobre puro, cobre recubierto con una capa de níquel de 10 micras, cobre recubierto con una capa de estaño de 0.5 micras y cobre con una capa de oro de 0.5 micras. El ensayo se realizó en una cámara mixta de gases, la atmósfera en esta cámara tiene concentraciones de SO₂, H₂S y/o NO₂ menores a 1ppm, con temperatura constante a 25° +/- 1° y humedad relativa de 50-95%.

Sharma [48] colocó muestras de níquel, cobre y plata en una cámara, con un suministro de gases a una velocidad de 120 m/min, en ciclos de 24hrs y 12hrs. En el ensayo se controló tanto la temperatura como la humedad relativa.

Sterling y Atrens [49] colocaron muestras de cobre de 100 x 75 mm en una cámara de niebla salina acidificada, a una temperatura de 50°C +/- 2°C. La solución empleada fue de 50 g/l de

NaCl, a la que se adiciono ácido acético (pH de 3.2). El ciclo fue de 24 horas, de las cuales 16 fueron de exposición a la solución y las 8 restantes, al ambiente del laboratorio. Estos mismos autores realizaron ensayos con una temperatura de 80°C +/- 5°C. En la solución de 50g/l de NaCl, el pH se ajustó a un rango de 6.5 - 7.2, el ciclo de la cámara fue igual que en el experimento antes descrito.

De lo expuesto se constata la tendencia al desarrollo de metodologías, que en forma acelerada reproduzcan el daño observado, y su génesis en los metales y aleaciones de aplicación más común para exposición atmosférica.

Capítulo 3. Deterioro de dispositivos electrónicos por efecto de la corrosión atmosférica

3.1 ANTECEDENTES GENERALES

El equipo y dispositivos electrónicos tales como circuitos integrados, circuitos impresos, conectores, contactos, interruptores, dispositivos para el almacenamiento magnético de datos, entre otros; se pueden degradar por una variedad de efectos eléctricos, magnéticos, mecánicos y químicos. Entre las causas más importantes de la degradación química está la corrosión atmosférica.

La corrosión de partes o componentes críticos de dispositivos electrónicos puede producir un amplio espectro de consecuencias que van desde ruido en la señal, incremento en la resistencia del circuito, corrientes en cortocircuito, entre otras situaciones que se pueden traducir en fallas intermitentes, hasta la incapacidad total del equipo para seguir operando. Si bien algunas de éstas fallas, sobre todo las intermitentes, no pueden ser catalogadas explícitamente como corrosión, si son precursores de ésta, como es el caso de la generación de cortocircuitos entre pistas por efecto de la presencia de humedad.

La corrosión de los componentes o partes de equipo electrónico es con frecuencia más crítica que la de otros objetos, ya que no se demanda una sensible pérdida de masa [4], como en los materiales estructurales, para que se presenten inconvenientes en la operación del sistema, además de que por corrosión se puede producir la falla de éstos. Esto se debe a que la degradación o deterioro afecta las propiedades eléctricas del dispositivo (conductividad, resistencia, etc.), y por consecuencia su desempeño. Por ejemplo la degradación de unas fracciones de miligramo en una pista de un circuito es razón más que suficiente para la pérdida de continuidad de éste. El funcionamiento de los dispositivos depende en gran manera de los requerimientos de los circuitos donde se encuentra el componente, y en general, las fallas inducidas por corrosión no se pueden definir de una manera confiable.

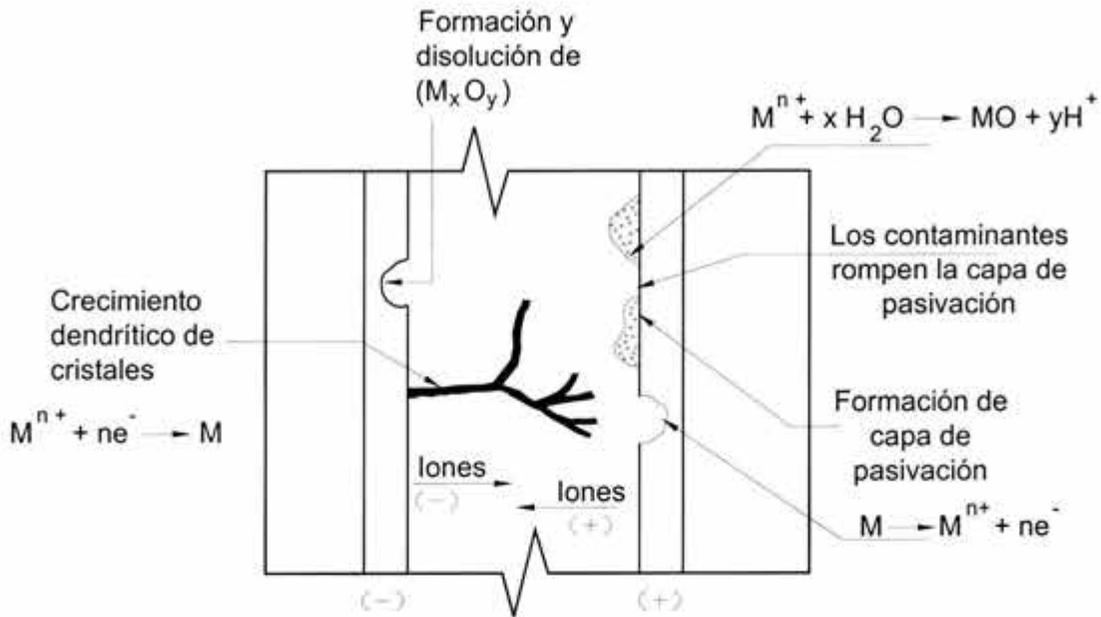
Los metales y aleaciones que están comúnmente presentes en componentes y dispositivos electrónicos abarcan [4, 50]:

- a. Aluminio y cobre empleados en pistas
- b. Latón en terminales y conectores
- c. Aceros inoxidable y galvanizados utilizados para jaulas de Faraday y como elementos de soporte o estructurales
- d. Estaño, oro, plata y níquel utilizados comúnmente como recubrimientos
- e. Aleaciones plomo-estaño las cuales se aplican en procesos de soldadura.

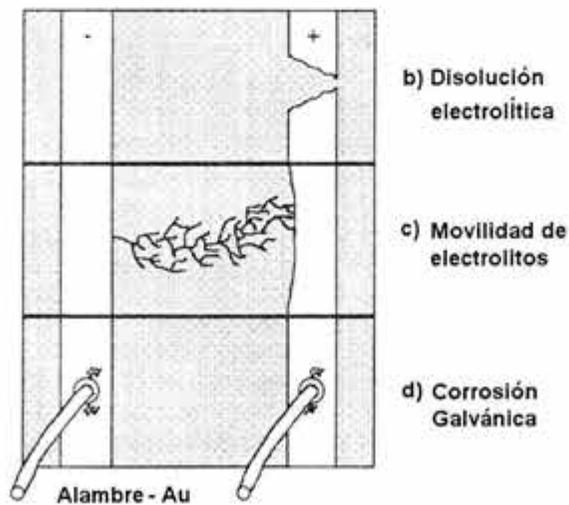
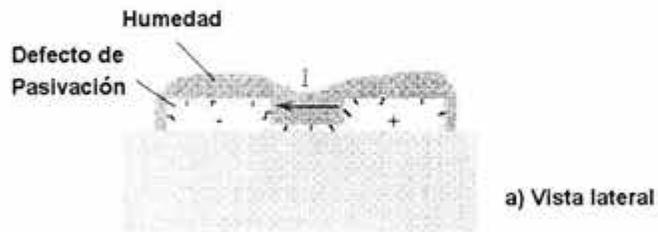
Con base en esto y a partir de la diversidad de ambientes en los que éstos se encontrarán presentes es factible visualizar el grado de complejidad bajo el cual se produce el deterioro por corrosión en equipo electrónico.

Algunos autores [4, 51, 52] se refieren a los siguientes tipos de corrosión en componentes electrónicos (figuras 3.1 a 3.3):

- a. Corrosión anódica. Dado el espaciado existente en circuitos integrados, cuando un potencial es aplicado se producen gradientes del orden de 10^5 , 10^6 V/cm, los cuales aceleran las reacciones electroquímicas y la migración iónica. En circuitos integrados que trabajan en potenciales positivos es posible la corrosión de elementos con aluminio o recubiertos con éste, esto se produce cuando la combinación del campo eléctrico, la humedad atmosférica y la contaminación con haluros alcanza valores críticos para los cuales se presenta el deterioro de los recubrimientos con aluminio. Metalizados de oro y cobre son susceptibles de corrosión en esas condiciones.
- b. Corrosión catódica. Metalizados de aluminio trabajando en polaridad negativa se pueden corroer en presencia de humedad en condiciones alcalinas.
- c. Migración metálica electrolítica. Detectada originalmente en los conectores mecánicos, este inconveniente se presenta en aleaciones de plata bajo condiciones de humedad y campo eléctrico. Bajo estas condiciones los iones de plata migran a las superficies catódicas formando dendritas, las cuales crecen y eventualmente provocan cortocircuitos y arcos. Se ha demostrado que bajo condiciones particulares de humedad y gradientes de voltaje se presentan daños severos de tal forma que una exposición de 30 días equivalga a 4 años de servicios. Otros metales susceptibles de migración electrolítica son el oro, estaño, plomo, paladio y cobre.
- d. Deterioro a través de discontinuidades en el recubrimiento. Para prevenir que se peguen los conectores y contactos eléctricos es usual que éstos se recubran con un metal noble como por ejemplo el oro. Como este recubrimiento no es uniforme entonces el sustrato puede presentar corrosión en las discontinuidades (figuras 3.2 y 3.3), acentuándose el problema por la celda galvánica a la que se da lugar. Si el sustrato es cobre o plata y es expuesto a un ambiente rico en sulfuros o cloruros los productos de corrosión pueden emerger (fluir) de las discontinuidades formando una capa de alta resistencia eléctrica.
- e. Corrosión-desgaste de conectores con recubrimiento de estaño. En contactos recubiertos con estaño se presenta la formación de depósitos de óxido de estaño.
- f. Corrosión galvánica. Este fenómeno se presenta cuando dos materiales diferentes como el aluminio y el oro están presentes en el dispositivo, tal como sucede en circuitos integrados donde los polímeros empleados para el empaque del dispositivo son porosos o los elementos de sellos se fracturan, situación que en combinación con la humedad del ambiente da lugar a un efecto galvánico entre los diferentes componentes metálicos del circuito.
- g. Corrosión acelerada por la presencia de fundentes. El empleo de fundentes es necesario en los procesos de unión de elementos conductores, sin embargo éstos en ocasiones no son removidos después de la operación, lo cual aunado a su carácter higroscópico da lugar a la aceleración del deterioro por corrosión.
- h. Corrosión de aluminio por cloruros halogenados. Los solventes halogenados empleados en la producción de circuitos integrados e impresos producen deterioro en los componentes de aluminio, la contaminación de la humedad por los solventes incrementa la velocidad de corrosión.



(a)



(b)

Figuras 3.1a y 3.1b. Mecanismos de falla que se pueden presentar entre dos caminos conductores en un dispositivo electrónico

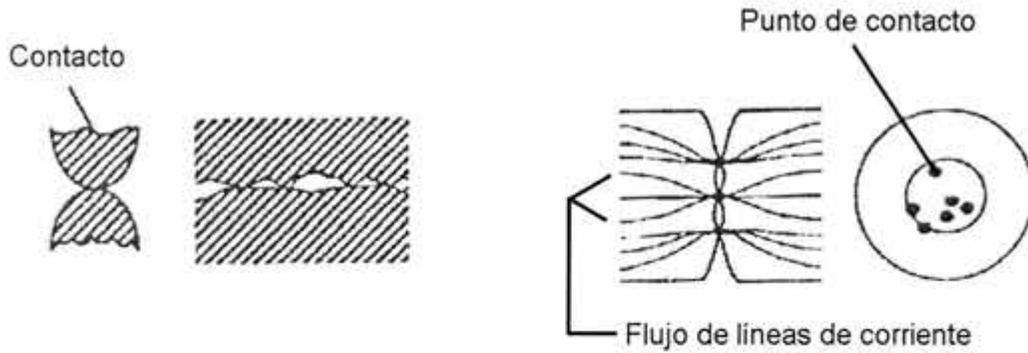


Figura 3.2. El flujo de corriente entre dos elementos de contacto (conectores) se produce a través de regiones discretas dado el grado de rugosidad que presentan las superficies, por lo que cualquier depósito de productos de corrosión en éstas zonas dará como resultado un sensible incremento en la resistencia del circuito, influyendo por lo tanto en la señal transmitida.

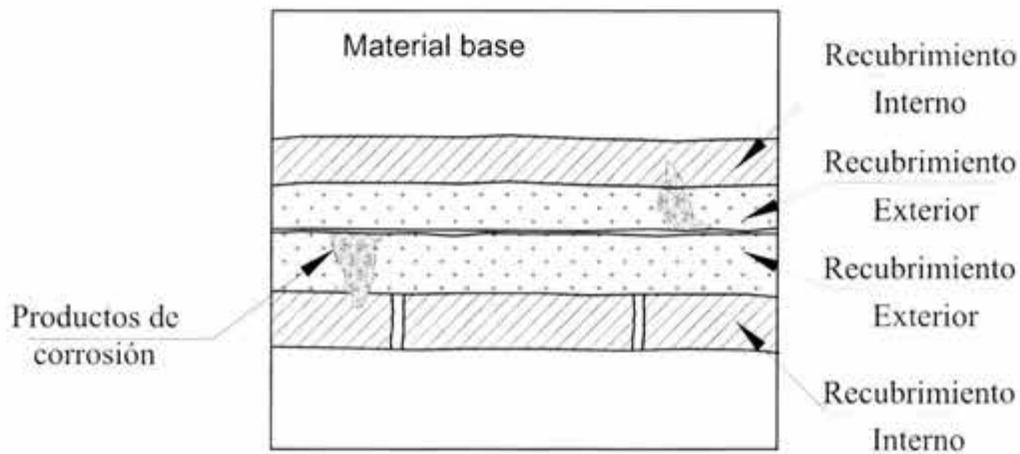


Figura 3.3. Depósito de productos de corrosión en las superficies de contacto, El efecto de esto es una disminución del área real de contacto.

La problemática de corrosión en equipo electrónico se presenta aún para pérdidas mínimas de material, esto es, no se requiere de una evidencia visible del problema para definir la existencia de éste, lo cual demanda una labor de inspección a detalle y con herramientas tan especializadas como la microscopía electrónica de barrido y el EDS [7].

Lo anterior combinado con el desconocimiento del impacto que el deterioro por corrosión tiene en las fallas del equipo electrónico, así como también por el tiempo necesario para que éstas se manifiesten, ha dado lugar a que estos fenómenos sean subestimados. Sin embargo, un estudio realizado por *The Electronic Analysis Group, Air Force Wright Aeronautical Laboratories* [8] dio como resultado que de los casos analizados se dictaminara que alrededor de un 20% de las fallas eran causadas explícitamente por corrosión, estimándose que un 83% de los problemas tenían su origen en materiales y manufactura.

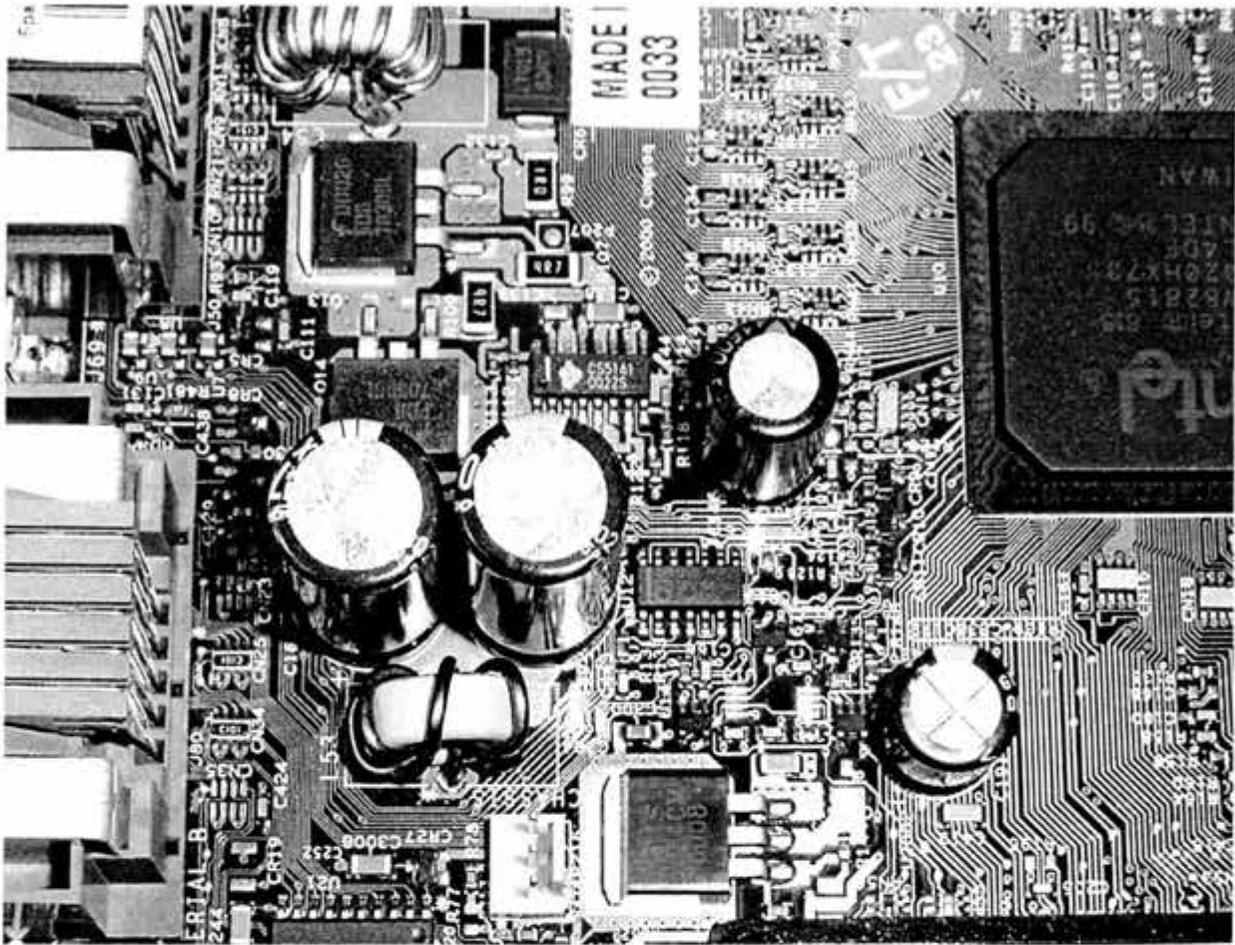
El interés en el estudio de los efectos de la corrosión en equipo eléctrico data de los 1930's [53], esto debido a los problemas que se presentaron en centrales telefónicas. Sin embargo, el énfasis en el análisis del efecto que la corrosión atmosférica tiene en el funcionamiento del equipo electrónico se remonta a mediados de los años 1960's, producto de los inconvenientes que los dispositivos electrónicos del equipo militar norteamericano presentaron durante la guerra de Vietnam [54]. A raíz de estos problemas se desarrollaron estudios [55, 56] de los cuales se concluyó que una cantidad apreciable de las fallas presentadas habían tenido su origen en fenómenos corrosivos, producidos por las condiciones ambientales extremas características de dicha región del planeta. Estas fallas se suscitaron debido a que durante el diseño no fue considerada la posibilidad de deterioro por medio ambiente. Dicha situación prevalece hasta hoy en día, a pesar de que durante las labores de mantenimiento se ha comprobado la presencia de estos fenómenos. Lo anterior sobre todo en condiciones que se caracterizan por una elevada humedad relativa típica de regiones tropicales o costeras, aún cuando también se pueden presentar inconvenientes en equipo instalado en sitios como la ciudad de México.

El desprecio o la subestimación del efecto que los fenómenos corrosivos pueden tener en las fallas del equipo electrónico se debe a diversas causas como la falta de información, la suposición de que las condiciones de servicio son favorables (aire acondicionado, reducida concentración de contaminantes, etc.) y por último basados en la limitada vida útil de una buena parte del equipo electrónico, el cual se vuelve obsoleto antes de que el deterioro por corrosión se manifieste, sin embargo es conveniente considerar que :

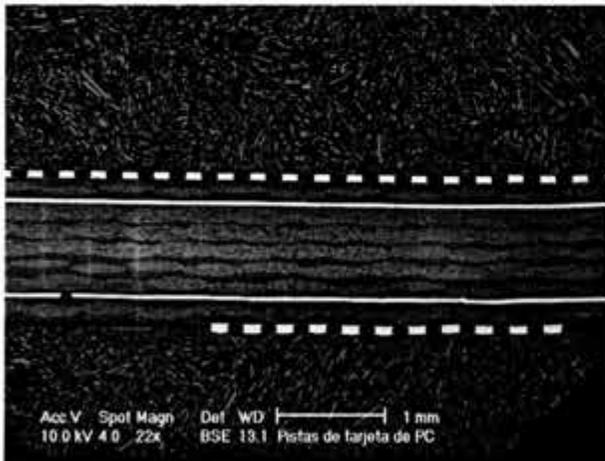
- a. El equipo electrónico se encuentra instalado en una gran diversidad de condiciones ambientales, mucho más agresivas que las típicas del pasado (basta recordar las restrictivas condiciones bajo las cuales eran instalados los *main frames* hace dos décadas y compararlos con las condiciones bajo las cuales se desempeñan estaciones de trabajo y servidores en la actualidad, o por ejemplo las condiciones bajo las cuales se encuentra cualquier procesador instalado en un automóvil moderno).
- b. Por su diseño y dimensiones el equipo electrónico moderno es más susceptible a problemas por medio ambiente (incremento en el número de componentes por unidad de área, reducción de las dimensiones de las pistas conductoras y contactos, entre otros).
- c. Equipo más complejo y sensible en cuanto a la distorsión de las señales que procesa.

De lo reportado por [6, 53] se define la problemática de la corrosión en la industria electrónica, de acuerdo a las siguientes tendencias:

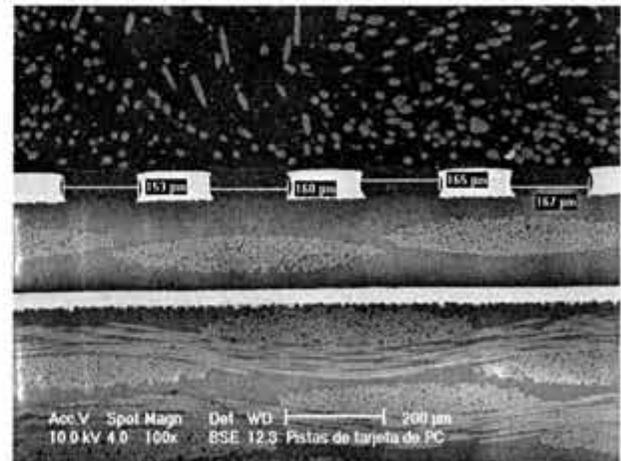
- Mayores velocidades de operación
- Menores corrientes y voltajes
- Menor espaciado entre elementos en las tarjetas
- Gran densidad de interconexiones con menores presiones de contacto
- Mayor densidad de componentes con menor tamaño y espaciado, y menores secciones metálicas. (figura 3.4)
- Requerimientos de pistas con baja resistencia.
- Exposición de equipo electrónico a condiciones más severas.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4. En el diseño de los equipos electrónicos modernos (por ejemplo tarjeta de PC), la densidad de los elementos y dispositivos que constituyen el sistema es cada día mayor (a), razón por la cual los caminos conductores reducen las dimensiones y las distancias entre éstos (b, c).

De los resultados de los estudios publicados se concluye que reducidas concentraciones de contaminantes [4,6,7] (características del medio ambiente de casi cualquier lugar del planeta) muy por debajo –ppb- de los umbrales de aceptación para seguridad y confort del ser humano, pueden causar daños por corrosión que conllevan a la falla del equipo electrónico.

Niveles bajos de humedad (en este aspecto no existe una opinión unánime, pero considerando los principios teóricos de la corrosión atmosférica se puede considerar que no existe una humedad crítica para que se presente deterioro en equipo electrónico por efectos corrosivos) y contaminantes corrosivos pueden causar problemas en circuitos impresos (pistas), circuitos integrados, conectores eléctricos, potenciómetros, pilas y otros componentes.

Adicional a lo anterior se tiene la tendencia al uso generalizado de equipo de alta tecnología, en el que la calidad de salida de las señales producidas los vuelve más sensibles a pequeños daños generados por el medio ambiente

La corrosión en equipo electrónico puede ocurrir durante la manufactura, almacenaje, transporte o desde luego, durante el servicio [1, 6, 8]. Los principales agentes que provocan el deterioro de componentes, conectores y pistas son [6,7,16,18,53] la humedad, los cloruros, H₂S, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, amoníaco y las partículas suspendidas; las cuales favorecen la precipitación de humedad, aumentan la conductividad de la capa de precipitado y por consecuencia, aceleran el fenómeno.

El ambiente al que están expuestos los circuitos electrónicos proviene de dos fuentes:

1. Materiales de los que está construido el equipo (degradación del polímero empleado en el encapsulado de microcircuitos), y los residuos de su propia manufactura (por ejemplo de los fundentes empleados en los procesos de soldadura).
2. Contaminantes presentes en la atmósfera.

De lo antes expuesto se puede concluir que:

- a. Los fabricantes de equipo trabajan intensamente sobre el tema con la intención de poder garantizar la operación y duración de sus productos bajo ambientes con grados de contaminación de ppm.
- b. Si bien el monitoreo y control se han orientado a la humedad y temperatura existe una multitud de variables ambientales que interactúan para dar lugar a la corrosión.
- c. La medición de los efectos individuales de las variables no proporciona información con relación a la predicción del fenómeno.
- d. La medida directa del efecto sobre componentes típicos es un mejor descriptor de las condiciones de operación y de su problemática.

Es muy común que la problemática de corrosión en equipo electrónico se caracterice por [53]:

1. No se presenten fallas al arranque
2. Fallas muy poco frecuentes durante el primer año
3. La frecuencia de fallas se incrementa en el tiempo
4. Problemas intermitentes entre los 12 y 24 meses de operación. Los contactos recubiertos con oro muestran decoloración, se pueden manifestar manchas en diversas zonas de la tarjeta. En este punto se debe recordar que dados los pequeños deterioros que son problemáticos en la operación del equipo electrónico solo se observaran problemas a simple vista cuando estos alcancen condiciones generalmente extremas.
5. Falla súbita después de 2 a 4 años, la limpieza del sistema (terminales) no tiene efecto en la operación.

Por otra parte, se ha comprobado que pequeñas cantidades de residuos de cloro en circuitos encapsulados pueden originar corrosión severa del patrón conductor y migración iónica entre los caminos conductores. El problema se agrava con pares de metales no similares, que crean condiciones para corrosión galvánica. Esta situación es favorecida a través de la aplicación de recubrimientos con espesores inferiores a una micra y la presencia de diferencias de potencial eléctrico entre los elementos, así como el empleo de materiales que han sido seleccionados sin tomar en cuenta la resistencia a la corrosión como parámetro de elección.

Así, las concentraciones de dióxido de azufre, que se ha demostrado generan inconvenientes en equipo electrónico son del orden de 30ppbv (partes por billón volumen), mientras que el límite aceptable para exposiciones prolongadas del ser humano a este contaminante es del orden de 1000 ppbv; en el caso de ácido sulfhídrico (H_2S) las concentraciones correspondientes son 10 y 10000ppbv respectivamente. Un año de exposición en ambientes con tal agresividad puede resultar en un deterioro significativo del equipo o componentes electrónicos. Lo anterior se traduce que aún en ambientes catalogados normalmente como benignos, se ha encontrado daño.

Se concluye que en general cualquier dispositivo electrónico está expuesto a deterioro por corrosión ambiental. Sin embargo, algunas industrias y ambientes favorecen a ésta, en particular se puede hacer referencia al equipo instalado en climas semitropicales o tropicales, en ciudades con un alto grado de industrialización y como consecuencia de contaminación; tal como es el caso de Coatzacoalcos, Veracruz, y Tampico, Tamaulipas en México. Como ejemplo de esto en la figura 3.5, se observa (a diferentes grados de detalle) el estado de las tarjetas electrónicas de equipo telefónico de uso residencial retiradas de servicio después de tres años.

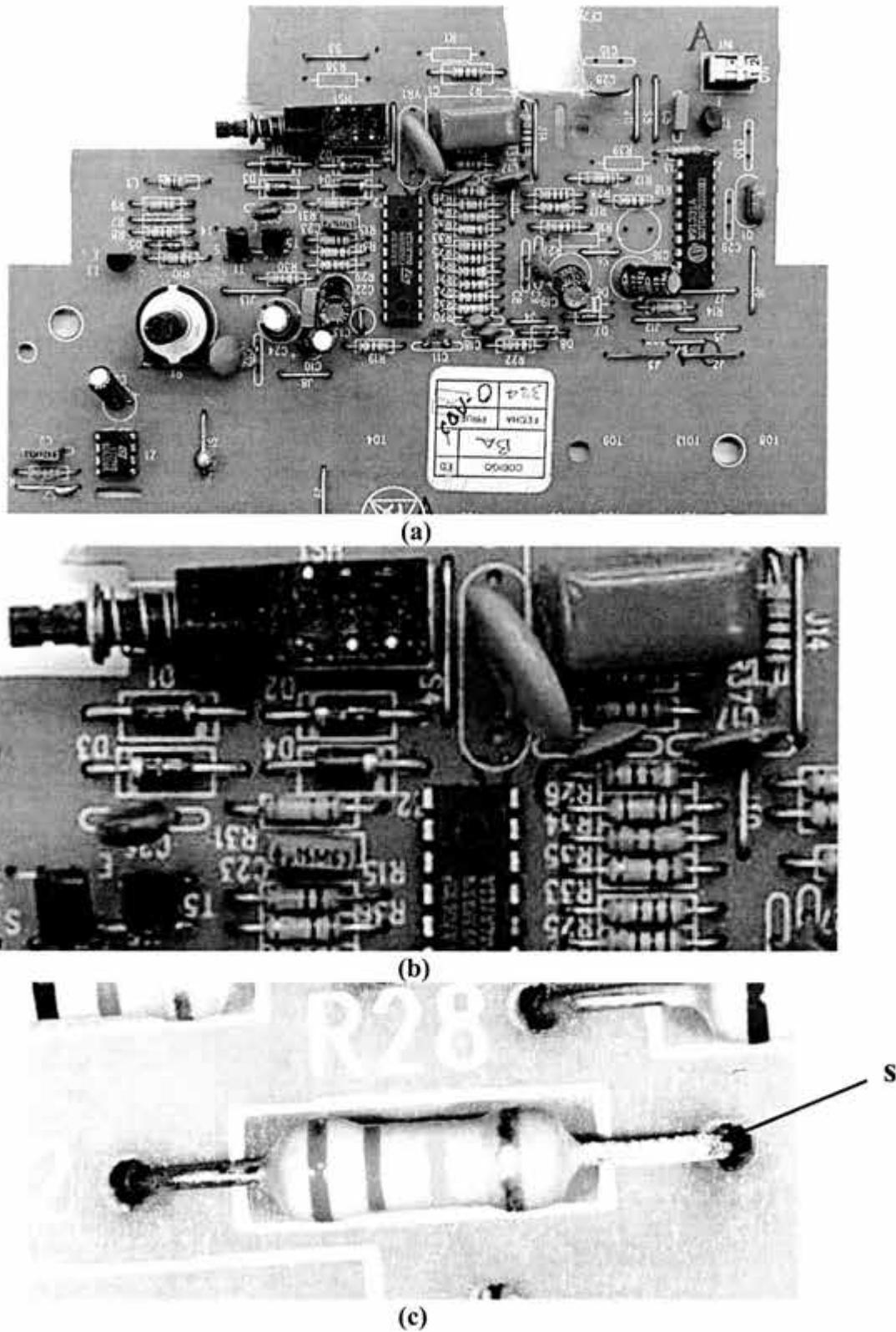


Figura 3.5 Circuito impreso correspondiente a un teléfono de tipo residencial instalado durante tres años en Coatzacoalcos, Veracruz (a). En (b) se observa la presencia de depósitos en algunos de los elementos metálicos de la tarjeta, a mayor detalle (c) es posible ver el depósito de sulfatos(s).

3.2 VARIABLES PRINCIPALES DEL DAÑO POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA. SU EFECTO Y PROCEDENCIA

Como fue ya mencionado en el capítulo 2 la corrosión atmosférica depende de la humedad del ambiente, la temperatura y los contaminantes que se encuentran dispersos en el aire. Dada la variabilidad que estos factores tienen, es prácticamente imposible desarrollar modelos matemáticos que permitan determinar con precisión el comportamiento del material para unas determinadas condiciones de exposición. Debido a las mismas situaciones es imposible realizar ensayos de laboratorio que permitan correlacionar el tiempo de ensayo con el tiempo de exposición real.

Por lo que respecta a las condiciones características de la exposición en interiores (en general típicas para el equipo y dispositivos electrónicos) éstas son menos agresivas que las establecidas para exteriores [35, 36, 37, 42], esto considerando la misma situación geográfica. La agresividad de las atmósferas típicas en interiores es, en general, muy diferente para los países desarrollados que para las economías emergentes, esto se debe no solo a las diferencias climáticas sino más bien a la presencia de equipos de acondicionamiento de aire, situación que reduce sensiblemente los tiempos de humectación, a la vez de disminuir la concentración de contaminantes. En países como México el empleo de sistemas de aire acondicionado está muy limitado, lo que se traduce a que una gran parte del equipo electrónico esté sometido a condiciones mucho más críticas y agresivas que las encontradas en los países como EUA, Canadá y la Unión Europea. Por tal razón los resultados reportados en la literatura, con relación al deterioro del equipo electrónico, no pueden ser considerados de aplicación universal. Por consecuencia en países como México deberán tenerse mayores cuidados en cuanto al deterioro ambiental en los dispositivos electrónicos.

Para determinar la corrosividad de una atmósfera es necesario relacionar entre sí el efecto de todos los factores que influyen en los mecanismos de deterioro, como:

- a) Tiempo de humectación de la superficie metálica (habrá que tomar en consideración que no se requiere de una humedad relativa superior al 80 % para que se pueda presentar daño por corrosión). Para la corrosión de equipo electrónico el tiempo de humectación, que es una variable fundamental propuesta para el sistema ISO, no tiene la misma significación, ya que el concepto de humedad crítica no existe [53] y una elevada humedad no representa necesariamente elevadas velocidades de corrosión, aunque si es un factor de primordial importancia
- b) Cantidad de contaminantes que pueden depositarse en la superficie metálica, en particular sulfuros reactivos y cloruros reactivos.

De acuerdo a la norma ISO 9223:1992a [30], se consideran como elementos clave de la corrosión:

- Tiempo de humectación
- Los niveles de SO₂ y NaCl

Existen otros tipos de contaminantes que pueden ejercer un efecto agresivo: NO_x, H₂S, humos en zonas industriales, CaCl₂ y MgCl₂, en las regiones costeras y otros específicos de un determinado microclima como el cloro, compuestos orgánicos, PH₃ [59], HF [60], partículas, etcétera. En la

tabla 3.1 se presentan las fuentes más comunes de contaminantes de interés en la corrosión atmosférica.

Tabla 3.1. Algunas fuentes comunes de constituyentes reactivos del medio ambiente de acuerdo con la norma ANSI/ISA-S71.04-1985 “Condiciones del Medio Ambiente para Medidas de Procesos y Sistemas de Control: Contaminantes Aerotransportados”

Constituyente		Fuentes Comunes
H ₂ S	Ácido sulfhídrico	Emisiones geotérmicas, actividades microbiológicas, procesamiento de combustibles fósiles, pulpa de madera, tratamiento de aguas de desecho, combustión de combustibles fósiles, fusión de minerales, emisiones de autos, manufactura de ácido sulfúrico.
SO _x	Óxidos de azufre	Combustión de combustibles fósiles, emisiones de autos, fusión de minerales, manufactura de ácido sulfúrico, humo de tabaco
HF	Acido Fluorhídrico	Manufactura de: fertilizantes, aluminio, cerámicos, aceros, dispositivos electrónicos, combustibles fósiles.
NO _x	Óxidos de nitrógeno	Microbios, emisiones de automóviles, combustión de combustibles fósiles, industria química.
N ₂	Nitrógeno orgánico activado	Emisiones de automóviles, desperdicio de animales, combustión de vegetales, aguas negras, pulpa de madera.
NH ₃	Amoníaco	Microbios, aguas negras, manufactura de fertilizantes, vapor geotérmico, equipo de refrigeración, productos de limpieza, máquinas heliográficas.
CO	Partículas de carbón	Combustión incompleta (constituyente de aerosoles), fundición.
	Monóxido de carbono	Combustión, emisiones de automóviles, microbios, árboles y pulpa de madera
Cl ₂ , ClO ₂	Cloro	Manufactura de cloro, manufactura de aluminio, molinos de papel, descomposición de desechos, productos de limpieza
	Dióxido de cloro	
HCl	Ácido clorhídrico	Emisiones de automóviles, combustión, procesos oceánicos, combustión de polímeros
HBr, HI	Componentes Halogenados	Emisiones de automóviles
Cl ⁻	Iones cloro	Contenido de aerosoles, procesos oceánicos, procesamiento de minerales.
O ₃	Ozono	Procesos atmosféricos fotoquímicos que involucra óxidos de nitrógeno e hidrocarburos oxigenados, emisiones de automóviles, filtros electrostáticos, etc.
C _n H _n	Hidrocarburos	Emisiones de automóviles, procesamiento de combustibles fósiles, humo de tabaco, tratamiento de agua, microbios, fuentes naturales, molinos de papel.
	Polvo	Cristal de roca, combustión, fuentes industriales diversas.
HCHO	formaldehído	Adhesivos, humo de tabaco, combustión de biomasa, plásticos.
HCOOH		

3.3 METALES Y ALEACIONES COMÚNMENTE UTILIZADAS EN DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS Y SU SENSIBILIDAD A LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES.

Los metales mas utilizados en la industria eléctrica y electrónica son aluminio (aleaciones de Al-Si, Al-Cu), cobre, aceros galvanizados e inoxidables, latón, soldaduras de plomo-estaño, y níquel, oro, plata y estaño como recubrimientos. Cada uno de éstos presenta una sensibilidad y comportamiento diferente ante los diversos contaminantes que se encuentran en la atmósfera, para este caso deberán tomarse paradigmas que consideren los espesores y condiciones en las cuales se encuentran cada uno de los metales bajo análisis, por consecuencia no deberán extrapolarse los resultados obtenidos en elementos estructurales para el comportamiento a nivel

de dispositivos eléctricos y electrónicos, sin embargo como guía y considerando lo reportado en la literatura se tiene:

Aluminio y sus aleaciones. Son sensibles a la exposición en atmósferas contaminadas con NO, NO₂, Cloruros y SO₂ [18, 42]. Así mismo se observa un efecto de aceleración de la corrosión provocada por el Cl₂, y HCl.

Los productos de corrosión encontrados después de la exposición a SO₂ son Al₃(SO₄)₂(OH)₅ 9H₂O y sulfatos de aluminio hidratados, la exposición a este contaminante conduce a un ataque localizado, en la capa superficial.

Por la exposición de componentes de aluminio a óxidos de nitrógeno se produce alumina (Al₂O₃) y/o hidróxidos de aluminio (Al(OH)₃).

Ante la presencia de ozono (O₃) se presenta corrosión uniforme, dando lugar a los mismos productos que cuando el aluminio es expuesto a NO₂.

Con gases tales como H₂S y CO₂, o hay incremento en la velocidad de corrosión.

No es susceptible a crecimiento dendrítico por migración electrolítica

Cobre.- Es sensible a SO₂, H₂S, NO y NO₂ [18, 22, 26, 36, 39, 40]. La exposición a SO₂ produce un ataque localizado, formando (Cu₃ SO₄(OH)₄). En la exposición a NO₂ y O₃ los principales productos son, el óxido cuproso (Cu₂O) y nitratos de cobre.

Níquel.- Es susceptible a contaminantes tales como el SO₂, Cl₂, NO y NO₂ [37, 40]. La mayoría de los productos se presentan en forma de óxidos o hidróxidos, nitratos o amidas. En la exposición a SO₂ se forman sulfatos hidratados (NiSO₄ nH₂O). Con el NO₂ se generan óxidos e hidróxidos (Ni(OH)₂). De acuerdo a lo reportado en la literatura el níquel parece no ser afectado por el H₂S, y el NH₃ presentes en la atmósfera, los cuales llevan a un estado de pasivación al material.

Oro.- Normalmente se utiliza como recubrimiento. Por ser un metal noble no es susceptible a la oxidación en condiciones atmosféricas y por ende a una gran variedad de contaminantes. Presenta aceleración de la corrosión al ser expuesto a NO_x (NO+NO₂), así como para una mezcla de NO₂ y SO₂. [27]. Sus principales inconvenientes se generan cuando al ser aplicado como recubrimiento, éste resulta poroso [1, 4] dando lugar a un fuerte efecto galvánico. Se ha comprobado que en muchas ocasiones su empleo, más que benéfico para el sistema, resulta perjudicial por su elevado potencial catódico.

Plata.- Es sensible a H₂S, Cl₂ y HCl [36, 39]. Los gases como el Cl₂ y el HCl aceleran su deterioro; entre sus productos de corrosión están los cloruros, sulfatos y nitratos.

3.4 INCONVENIENTES GENERADOS POR EFECTO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN DIVERSOS ELEMENTOS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

El equipo electrónico típico (figura 3.6) consiste de una variedad de componentes tales como tarjetas de circuitos impresos, circuitos integrados, dispositivos discretos (interruptores, resistencias, diodos, juntas de soldadura), conectores y gabinetes. Los componentes al interior están expuestos usualmente a los mismos corrosivos del exterior, aunque las concentraciones pueden variar.

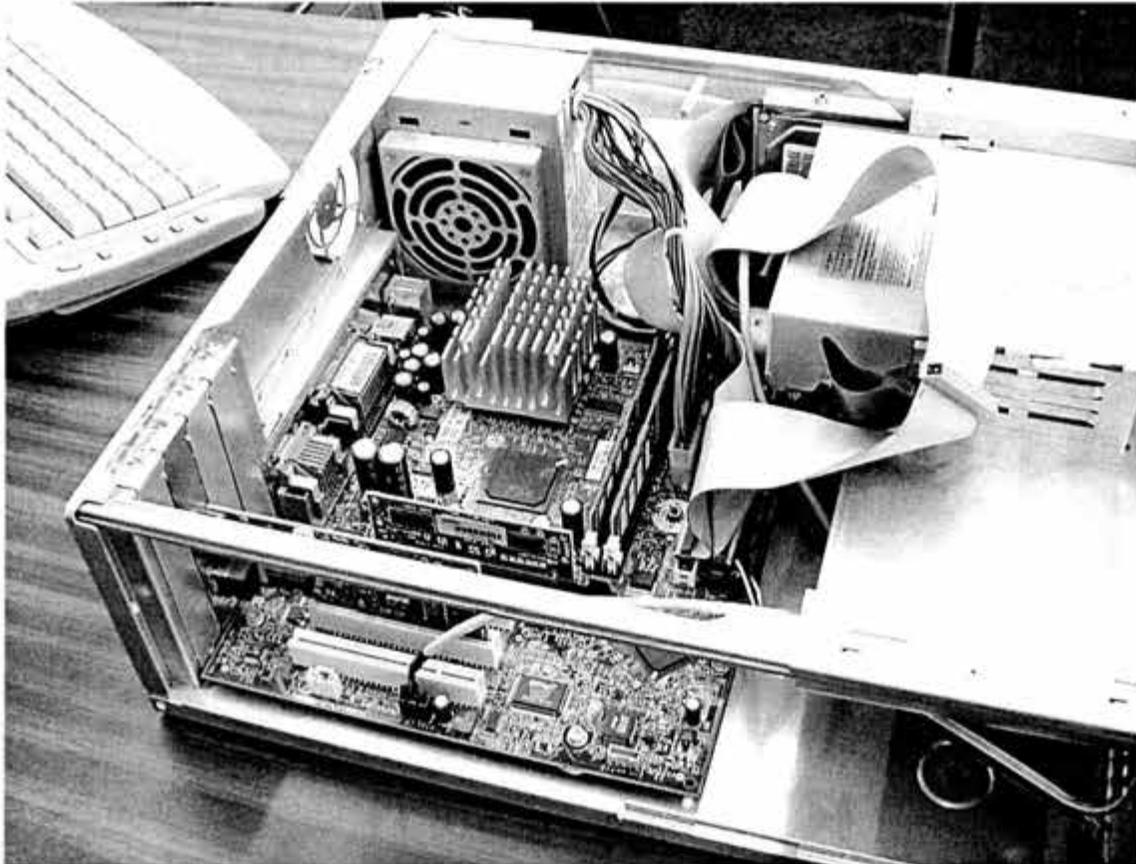


Figura 3.6 Configuración típica de la disposición de los elementos electrónicos en un gabinete cualquiera (gabinete de una PC).

Considerando que puede ocurrir una gran variedad de fallas inducidas por corrosión, es conveniente orientar el análisis de acuerdo a las diferentes partes que se pueden encontrar en cualquier dispositivo electrónico. Para esto se propone clasificarlos con base en sus dimensiones, características y aplicación, por lo tanto se pueden agrupar en:

- a) Dispositivos de microelectrónica. Circuitos integrados
- b) Dispositivos de macroelectrónica. Interruptores, conectores, resistencias, capacitores, tarjetas impresas, pilas, etc.
- c) Dispositivos de almacenamiento magnético de datos. Discos duros

Adicional a lo anterior se puede considerar la problemática de los elementos mecánicos de sujeción y soporte (gabinetes, tortillería, etc). Dadas sus características éstos no son analizados.

Tarjeta de circuito impreso. Las partes metálicas de éstas, tales como el patrón conductor, están protegidas habitualmente contra los efectos ambientales con un recubrimiento orgánico (cuyo espesor es variable en función de las condiciones de servicio esperadas) [4,6] o mediante tratamientos de pasivación. Es usual el empleo de recubrimientos adicionales luego de que los componentes han sido montados. Otras partes metálicas de un circuito impreso, tales como contactos, conectores e interruptores; están expuestas al medio sin protección alguna, y por tanto son altamente propensas a los efectos de la corrosión atmosférica. Los conectores consisten comúnmente de una base de cobre, latón, cobre-berilio u otras aleaciones de cobre recubiertas con una capa delgada de oro, estaño o níquel, empleándose comúnmente recubrimientos intermedios con respecto a la capa superficial.

Las pistas de las tarjetas pueden sufrir diversos inconvenientes (figuras 3.1a y 3.1b) tales como formación de dendritas metálicas por disolución del patrón metálico conductor en el ánodo, disolución electrolítica, picaduras, y corrosión galvánica. Asimismo, se pueden presentar problemas intermitentes bajo condiciones de humedad relativa muy elevada. Esta situación se traduce en la presencia de condensado sobre las pistas, condición que a su vez da lugar a corto circuitos y fallas del sistema, las cuales desaparecen al disminuir el nivel de humedad. Este tipo de situaciones se presentan, por ejemplo, en equipo telefónico instalado en zonas costeras y donde las condiciones en el interior son prácticamente las mismas que en el exterior.

La disolución electrolítica se presenta en conductores de aluminio en presencia de diferencia de potencial eléctrico entre las pistas conductoras. Cuando existe la presencia de condensados sobre las pistas el conductor que posee el potencial eléctrico más alto, éste actúa como ánodo y se disuelve. Cuando los contaminantes contienen cloruros, la disolución del aluminio ocurre en forma semejante a las picaduras, y el dispositivo puede fallar por una discontinuidad en el conductor. Las pistas de otros metales, tales como el cobre, también se pueden disolver de manera anódica, aun bajo reducidas diferencias de voltaje entre los conductores.

La migración iónica (crecimiento dendrítico de cristales) es favorecida debido a que las pequeñas distancia entre conductores crean elevadas fuerzas de campo eléctrico, de tal forma que los iones metálicos generados en el conductor positivo se desplazan y reducen en el conductor polarizado catódicamente. Los iones al reducirse se depositan siguiendo un patrón dendrítico que se orienta al conductor positivo, pudiendo dar lugar a un corto circuito entre las pistas conductoras. Este fenómeno también se reporta para el caso de los circuitos integrados, el cual resulta más severo mientras más se reducen sus dimensiones.

Por sus características la disolución electrolítica y la migración iónica tienen el potencial para convertirse en los mecanismos de falla más importantes a futuro.

Contactos. Durante el contacto entre dos superficies y dada su rugosidad, éste se da solamente en pequeños puntos (figura 3.2) donde se juntan las irregularidades de ambas. El área de contacto mecánico está determinada principalmente por la fuerza de unión y la dureza de los materiales. Cuando la corriente circula a través de los limitados puntos de contacto físico entre las superficies se genera la "resistencia de contacto". Durante la corrosión de la superficie de contacto, resulta con frecuencia una capa de productos de corrosión (figura 3.3), la cual provoca una caída de voltaje adicional. Es común que el ataque origine productos de corrosión que reducen el área o el

número de los puntos de contacto. Una disminución de ésta eleva el riesgo de fallas por contacto intermitente. Si existen películas superficiales de productos de corrosión o contaminantes orgánicos, entonces la corriente que fluye a través del contacto se encuentra con una resistencia adicional por efecto de dichas capas.

La problemática de contactos recubiertos con delgadas capas de oro se presenta en la figura 3.7. El empleo del oro como recubrimiento usualmente da lugar a la formación de películas porosas, las cuales al generar una celda galvánica con el sustrato provocan la corrosión de éste (dado el elevado potencial catódico del oro), de tal forma que los productos de corrosión llenan los poros, fluyendo hasta la superficie, provocando con esto un incremento en la resistencia del contacto y pérdidas de la señal. Por lo anterior los contactos recubiertos con oro tienen una vida de servicio muy limitada en ambientes agresivos.

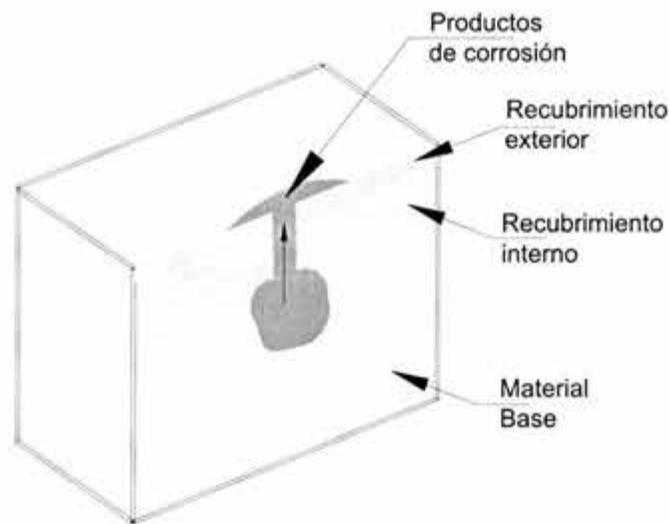


Figura 3.7 Corrosión a través de los poros presentes en recubrimientos de muy limitado espesor.

El fenómeno de fluencia de los productos de corrosión hacia la superficie del contacto, a través de los poros del depósito, no es un problema exclusivo de los recubrimientos con oro. En el caso de recubrimientos electrolíticos de níquel (figura 3.8) también se genera esta problemática.

Los productos de corrosión que se forman en los bordes de las superficies de contacto se depositan sobre la capa superior de oro, formando una película aislante en su superficie. Es evidente que la presencia de depósitos de metales muy nobles como el oro y en menor medida la plata o el cobre da lugar a la formación de micro pilas galvánicas con un potencial muy elevado, situación que favorece el ataque, acelera el deterioro de la parte y la inhabilitación del recubrimiento. Por lo que la aplicación de delgados depósitos de oro para mejorar el contacto entre elementos eléctricos da como resultado, en ambientes agresivos, notorias desventajas. Esta situación es contradictoria a la intención inicial del depósito. El níquel, que se usa como recubrimiento base en algunas ocasiones, reduce la formación de productos de corrosión del cobre. Sin embargo, en algunos ambientes, la corrosión y la formación de los productos de corrosión puede ser mayor en el níquel que en el cobre. Esto es característico para atmósferas que presentan SO_2 y cloruros como principales contaminantes

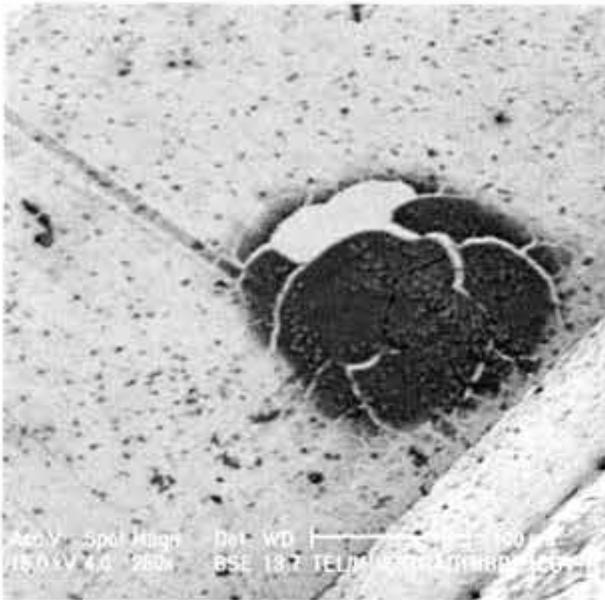


Figura 3.8a. Timbre de aparato telefónico. Se trata de una pieza de latón recubierta con níquel.

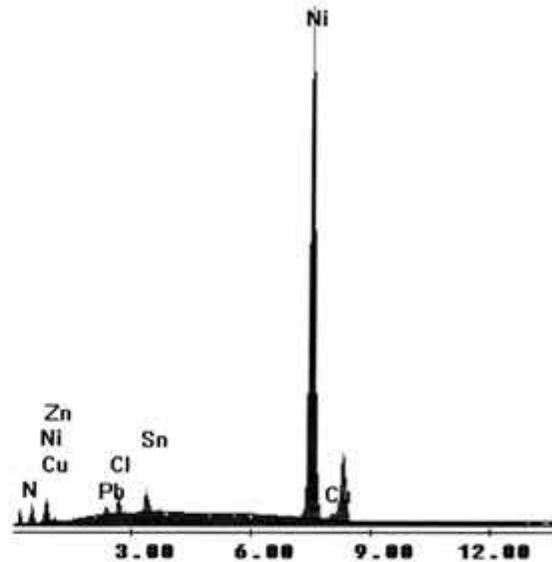


Figura 3.8b. Análisis mediante EDS del recubrimiento. Se presentan picos de Cu y Zn como consecuencia de un recubrimiento muy delgado y dado que el material base es latón

El deterioro de superficies recubiertas con oro tiende a ser acelerado por la presencia de diversos contaminantes, en el caso de que se tenga un revestimiento base níquel o que el material sobre el cual se realiza el depósito sea cobre, el deterioro será fomentado por altos niveles de humedad relativa, SO_2 , Cl_2 y H_2S . Atmósferas agrícolas o industriales tienen un efecto dañino en las superficies recubiertas con oro. Las industrias donde se manejan el Cl_2 y el H_2S , son uno de los ambientes más agresivos para las superficies recubiertas con oro.

En las superficies recubiertas con paladio o platino, los contaminantes orgánicos pueden resultar en la formación de capas aislantes. En este caso, la película superficial es un polímero orgánico en vez de una capa de óxido u otro producto de corrosión. Para aminorar este efecto, el paladio se recubre algunas veces con una delgada capa de oro.

En ocasiones en algunos contactos se pueden presentar reducidos movimientos relativos entre las superficies, situación que se traduce en un efecto combinado de corrosión-desgaste. Este movimiento relativo se puede causar por variaciones eléctricas o magnéticas repetitivas o por movimientos mecánicos o térmicos. Los efectos de corrosión-desgaste dan lugar a una aceleración del deterioro al presentarse una remoción de las capas de pasivación. Los metales empleados en contactos, que forman rápidamente óxidos (por ejemplo el estaño), son más propensos a este tipo de deterioro.

Se concluye entonces que la falla que se presenta usualmente en contactos o conectores eléctricos dependerá del recubrimiento, si éste es de oro se generarán depósitos y corrosión en las discontinuidades del recubrimiento, mientras que si se trata de estaño el mecanismo dominante es el de corrosión desgaste.

Otros elementos de interconexión. Además de los conectores se debe de considerar que en la electrónica es muy común el empleo de uniones soldadas. Tanto éstas como los conectores, por sus dimensiones, pueden soportar mayor daño que los elementos constitutivos de los circuitos integrados.

Las soldaduras PbSn sufren deterioro en presencia de humedad y contaminantes, así como residuos de fundentes.

Por otra parte en los circuitos y dispositivos empleados en electrónica también es común que se presenten fenómenos de corrosión galvánica [4, 6, 7, 53] ya que además de que las partes se encuentran a distancias muy reducidas, en muchas ocasiones éstas son producidas de materiales muy disímolos, situación que se traduce en la formación de celdas galvánicas. La corrosión galvánica también se presenta cuando piezas (por ejemplo conectores) fabricados de latón son recubiertos por estaño para favorecer operaciones de soldadura posteriores (las láminas de latón son recubiertas por inmersión o electrolíticamente con estaño, para posteriormente proceder al troquelado y formado de la parte). Resulta evidente la generación de una celda galvánica entre la superficie estañada y los bordes de latón de la pieza, los cuales se ponen al descubierto durante el troquelado.

Circuitos Integrados. Dadas las dimensiones de los componentes de éstos, los fenómenos que en ellos se suscitan tienen una serie de peculiaridades. Básicamente los circuitos integrados se pueden clasificar de acuerdo a su empaquetamiento:

- a. Encapsulado cerámico.
- b. Encapsulado en plástico (figura 3.9).

El encapsulado en polímero es el más empleado para microcircuitos (97%). Aun cuando se considera que el empaquetamiento es hermético, estrictamente son permeables al agua y por lo tanto vulnerables a la corrosión al ser expuestos en ambientes húmedos. La permeabilidad de la humedad en el plástico corresponde con el modelo de Fick, lo que representa que ésta puede penetrar en forma rápida. Es por tanto que la tecnología se ha orientado a mejorar la hermeticidad de los circuitos, ya que los principales inconvenientes se derivan de fallas del encapsulado.

El encapsulado cerámico presenta algunas diferencias con respecto al de polímero:

1. Se emplean conectores de aluminio en lugar de oro. Por lo que su mayor vulnerabilidad se presenta en las conexiones
2. El ambiente interno puede, en teoría, ser controlado (en el caso de los de encapsulado polimérico se presenta descomposición del polímero, mientras que en el cerámico se considera que esta situación no existe)
3. La cavidad del encapsulado no está totalmente rellena, por lo que no se requiere de defectos de éste para favorecer la condensación de humedad

Las situaciones expuestas conllevan a que también se presenten fallas por corrosión durante la operación de microcircuitos empacados en cerámico. Por otra parte se ha demostrado experimentalmente que puede presentarse una difusión crítica de agua en un encapsulado hermético en tiempos del orden de 2500 horas.

Además los encapsulados en cerámica pueden fracturarse durante la manipulación, soldadura o por efecto de ciclos térmicos, lo cual permite que la humedad y contaminantes penetren fácilmente. Suponiendo la hermeticidad del sellado se deberá evitar la presencia de humedad atrapada en el microcircuito, razón por la cual los microcircuitos son sellados en presencia de atmósferas con no más de 5000 ppm de agua.

En los microcircuitos las zapatas (conectores) de conexión usualmente son de cobre el cual se recubre con una aleación Sn-Pb para facilitar su soldadura. Estos se conectan al microcircuito a través de alambres de oro de 15 a 25 μ lo cuales son unidos por termocompresión o soldadura ultrasónica (figura 3.10 y 3.11)

En los microcircuitos se utiliza una gran variedad de materiales metálicos [52]. Sus pistas conductoras son de aluminio o cobre, con una separación mínima del orden de 0.5 μ . Los conductores pueden ser revestidos con oro, estaño, paladio o plata.

Los conductores tienen dimensiones extremadamente pequeñas (hasta de fracciones de micra) y forman un complejo patrón geométrico que es muy sensible a la presencia de humedad y contaminantes. Para brindar protección química y mecánica, muchas secciones de los conductores están cubiertas con una capa aislante de nitruro de silicio y/o una película de polímero orgánico.

Los microcircuitos que operan en altos niveles de potencia se corroen con menor frecuencia que los que trabajan a bajos niveles. La razón es que la temperatura en la superficie del microcircuito es más alta y por lo tanto la humedad relativa en la superficie disminuye.

En circuitos integrados con deficiente protección superficial se pueden presentar fenómenos de circulación de corriente a través de las superficies, esto por la presencia de iones metálicos, humedad en combinación con polvo y contaminantes que incrementan su conductividad, situaciones que favorecen los procesos corrosivos de sus conectores.

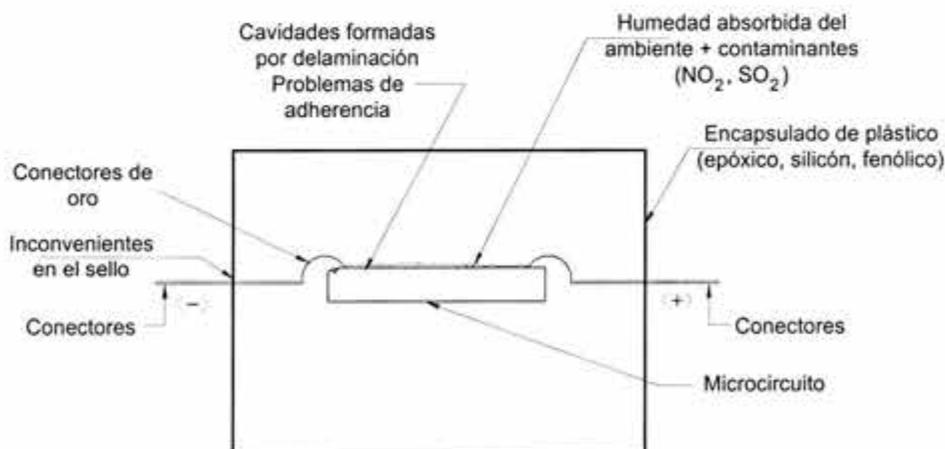


Figura 3.9 Microcircuito encapsulado en polímero en el cual se pueden presentar inconvenientes en el sello mecánico de los conectores, por falta de adherencia del polímero a los conectores de oro, por separación del circuito con el encapsulado. Todo lo anterior se da lugar en la presencia de humedad y contaminantes, lo que se traduce en deterioro por corrosión del microcircuito.

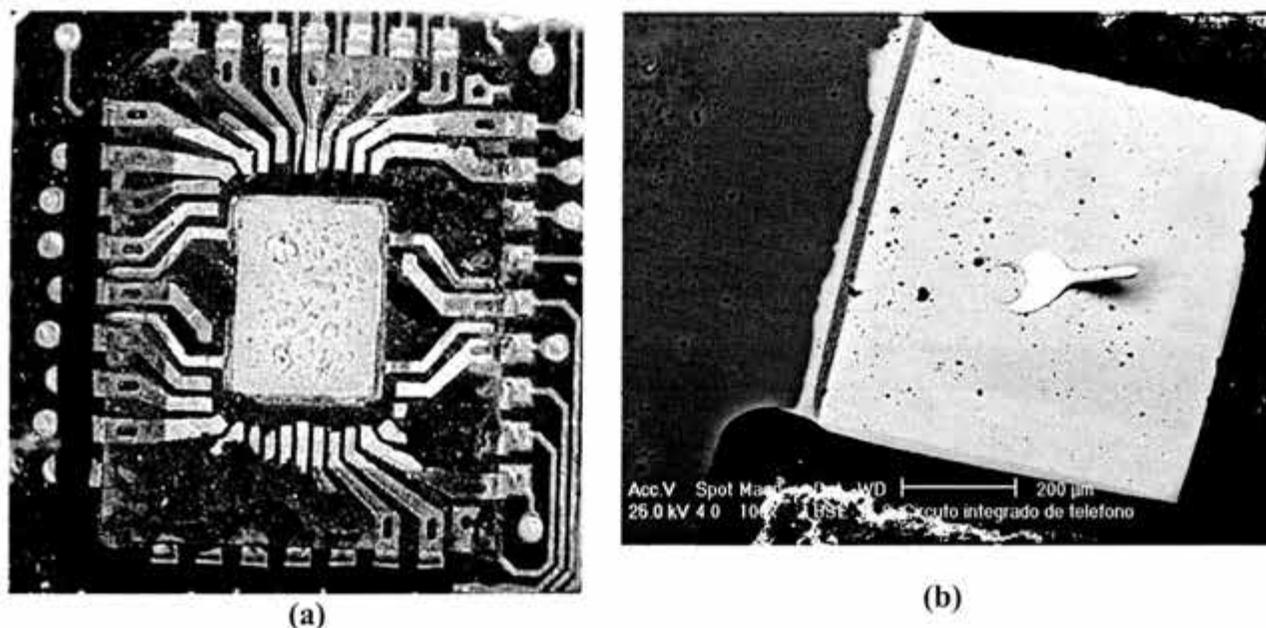


Figura 3.10. Microcircuito al que le ha sido retirado el encapsulado (a). En el centro se observa el dispositivo mientras que alrededor se encuentran las zapatas de cobre. Los conectores (alambres) de oro que unen las zapatas (recubiertas con Sn) con el dispositivo no se observan al haber sido retiradas con el encapsulado. El conector de oro (b) tiene un diámetro del orden de micras y es unido tanto a la zapata como al dispositivo por termocompresión o ultrasonido.

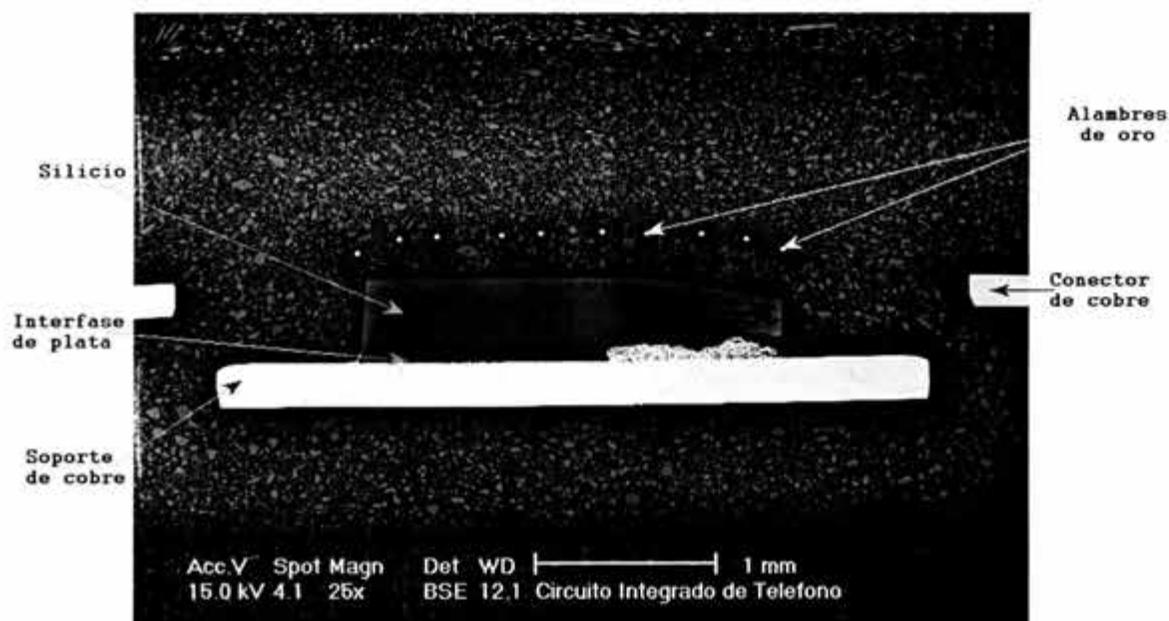


Figura 3.11. Vista en sección transversal del microcircuito

Dispositivos magnéticos para almacenamiento de datos. Todas las computadoras desde los *main frames* hasta las portátiles emplean alguna forma para almacenamiento secundario de datos, esto en base a dispositivos magnéticos-discos duros- (figura 3.12a). Esta tecnología, ampliamente usada en la actualidad, resulta vulnerable a la corrosión. El disco duro está constituido de una capa de material magnético duro a través del cual se almacena la información mientras que en la cabeza lectora se tiene un material magnético suave que permite la escritura y lectura. En la sección transversal del disco (figura 3.12b) se encuentra una capa de 10 a 50 nm de carbono, debajo de la cual se tiene la capa magnética de cobalto (10 a 100 nm), y un recubrimiento interior de Ni-P; la estructura del disco se produce de una aleación AlMg. La capa de carbono, mientras sea continua, representa una barrera efectiva contra la corrosión ya que separa la capa metálica del ambiente a la vez de actuar como un lubricante. Sin embargo, la presencia de discontinuidades (figuras 3.13, 3.14) en la capa de carbono da lugar a la formación de celdas galvánicas, con un factor de área muy desfavorable, donde el carbono actúa catódicamente mientras que el níquel y cobalto son oxidados. Esto se traduce en la formación de óxidos metálicos que se depositan en la superficie con los consiguientes inconvenientes en cuanto a la capacidad de almacenamiento o pérdida de información del dispositivo.

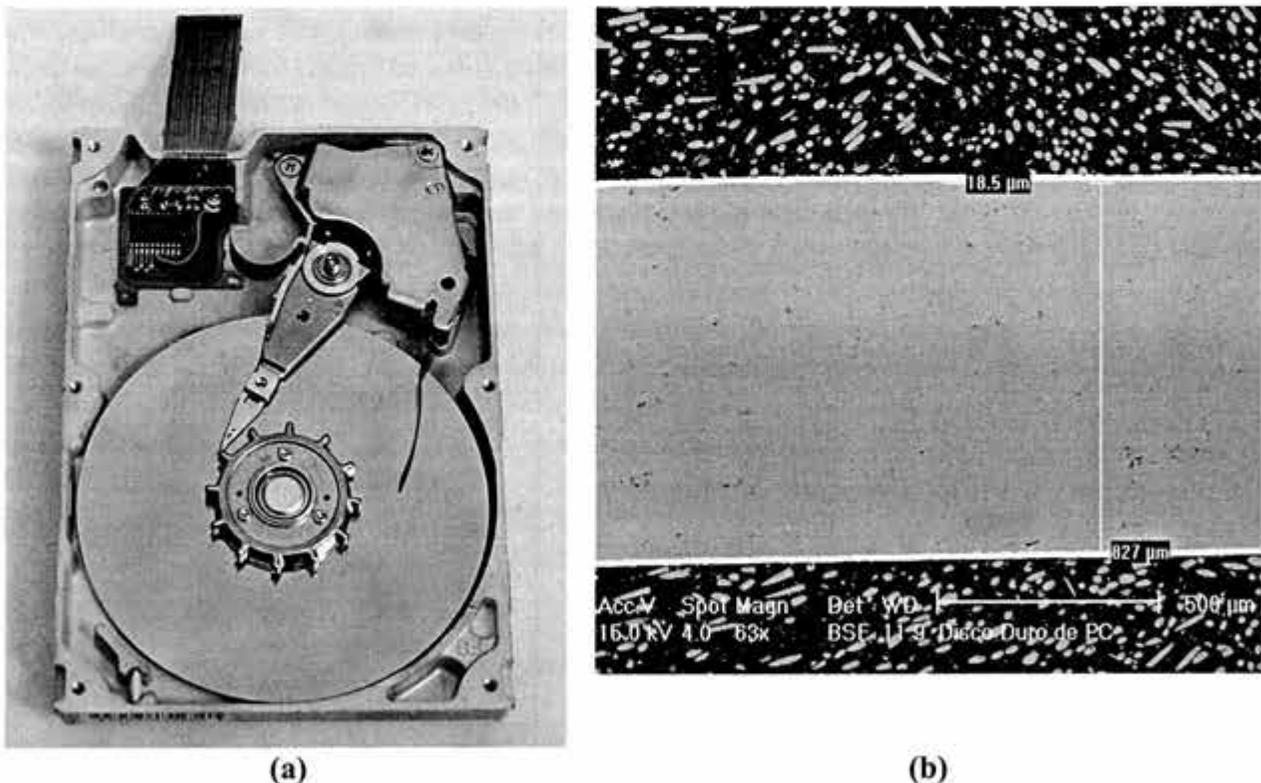


Figura 3.12 Se observa la estructura de un disco duro típico (a) con su cabeza lectora. De la sección transversal (b) se constata que está formado por un elemento base de AlMg de aproximadamente 820 micras de espesor, sobre el cual a ambos lados se deposita la aleación Ni-P (zona más clara), dado que la capa de cobalto es muy delgada (del orden de 0.1 μ) y su densidad es similar a la del níquel se confunde entonces con ésta.

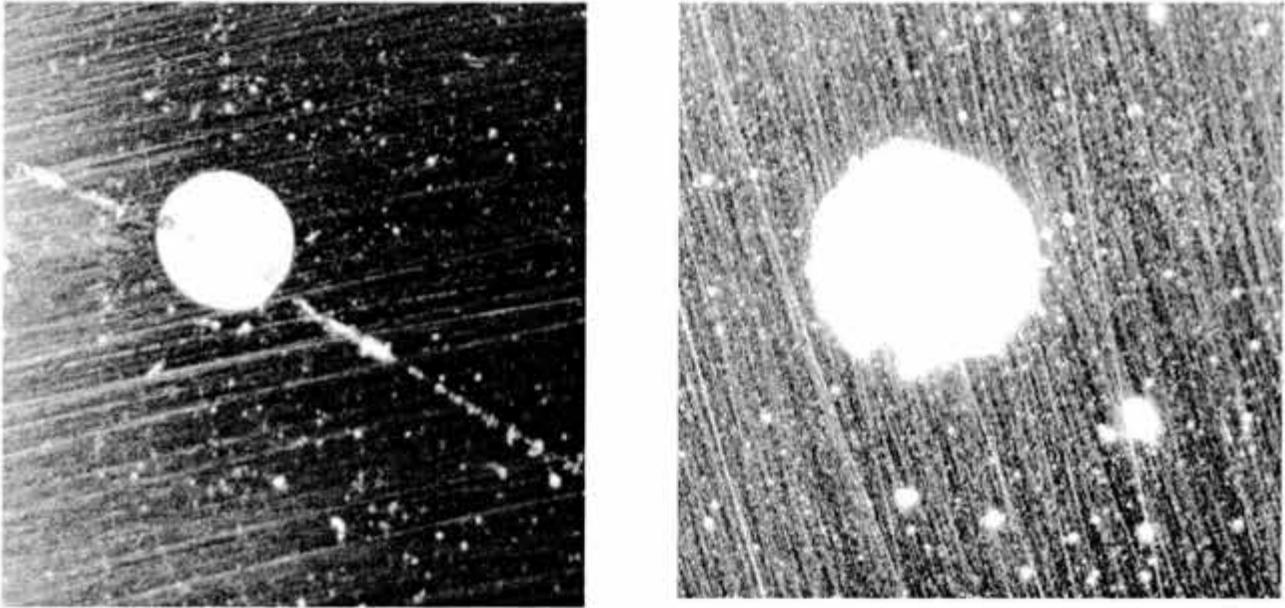
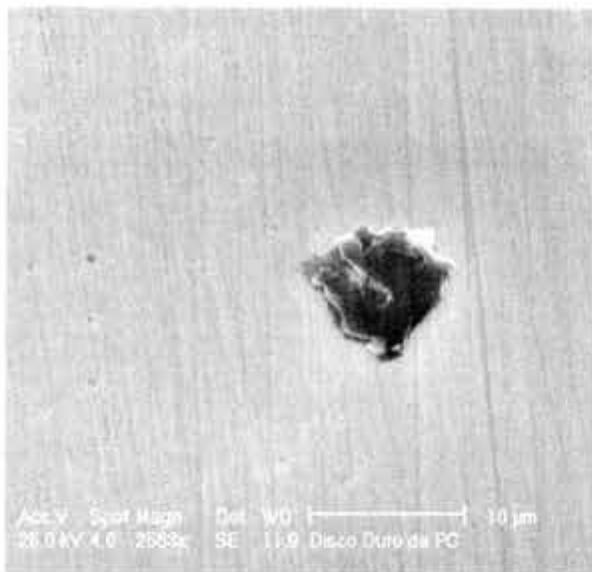
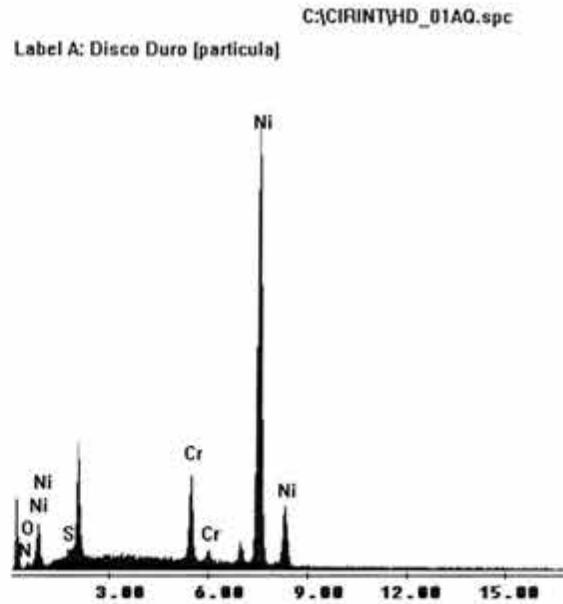


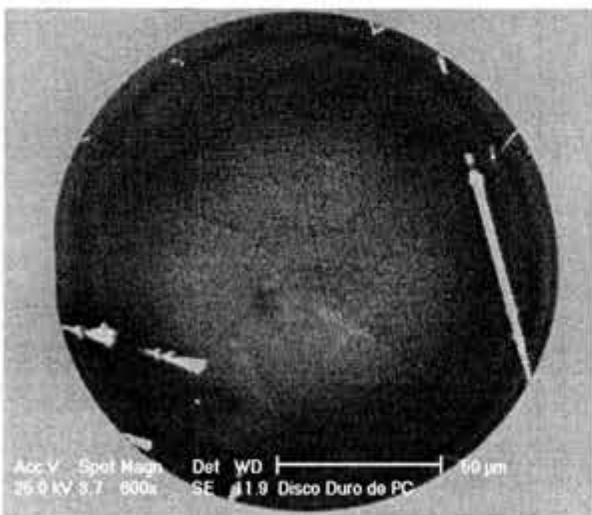
Figura 3.13. Se observa el recubrimiento de carbono del disco duro, así como la rugosidad de éste. En la figura de la izquierda es evidente la presencia de daño mecánico en forma de una raya que atraviesa la discontinuidad en el recubrimiento. En ambas imágenes se hace evidente la existencia de discontinuidades de diferentes dimensiones las cuales favorecen la presencia de celdas galvánicas y como consecuencia el deterioro por fenómenos corrosivos. En el caso de discontinuidades de menores dimensiones la corrosión se presenta preferentemente en la capa de cobalto, mientras que las de mayores dimensiones favorecen la corrosión de la capa base de NiP.



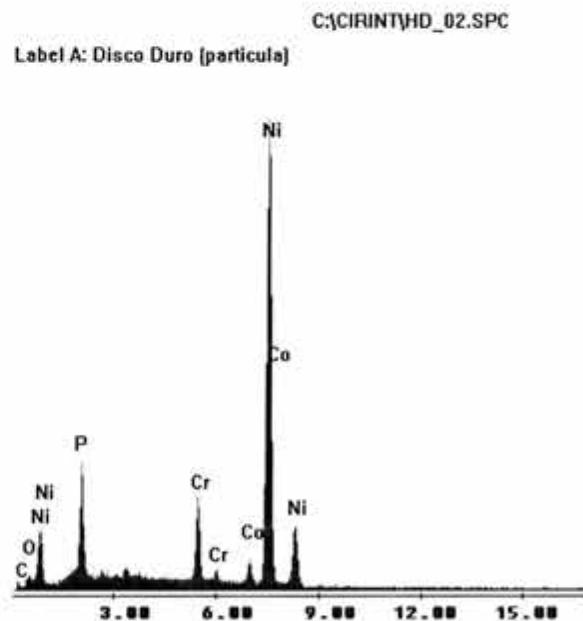
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.14 Imágenes de discontinuidades observadas en la superficie del disco duro (a, c), con su correspondiente análisis mediante EDS. Dado el pequeño espesor de los depósitos se tiene evidencia, en la señal analizada, de la composición de la capa base (NiP). Se constata en ambos casos la presencia de oxígeno.

3.5 DESARROLLO DE PRUEBAS DE CORROSIÓN PARA LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA.

Las pruebas aceleradas para simular el efecto de la corrosión [16, 48, 53, 61, 62, 63] tienen como objetivo determinar, de la forma más aproximada posible, las condiciones de deterioro que se presentan durante la exposición de un elemento. Para el caso de equipo y dispositivos electrónicos se han desarrollado una serie de metodologías de evaluación, varias de las cuales han sido establecidas por la ASTM (Tabla 3.2) [68,69,70,71,72,73]. La intención de todas estas pruebas es la de permitir la predicción del comportamiento del material o dispositivo y en lo posible predecir su vida útil.

Con el trabajo de Campbell y Thomas en los años 1930 [64], se dio inicio al desarrollo de pruebas ambientales en equipo eléctrico. A lo largo de 70 años se han desarrollado una gran variedad de métodos de prueba que por lo general incluyen uno o varios de los siguientes contaminantes: SO₂, O₃, NO_x, HCl, NH₃ y H₂S; a la vez de considerar las variables humedad y temperatura, las cuales pueden permanecer constantes durante el ensayo o variar en forma cíclica. De tal forma es posible simular diferentes condiciones de trabajo.

En un principio se emplearon pruebas con altas concentraciones de un solo gas como dióxido de azufre ó H₂S, ejemplo de esto son las normas JEIDA 25 y 32 y BS 2011, entre otras. Posteriormente se desarrollaron pruebas con mezclas de gases combinados con humedad.

Tabla 3.2 Pruebas de corrosión estandarizadas por la ASTM.

<i>Prueba</i>	<i>Descripción</i>
B117	Standard test method of salt spray (fog testing) [67]
G85-85	Standard practice for modified SALT spray (fog testing) [45]
G60-86	Standard test method for conducting cyclic humidity test [47]
G 87-84	Standard Practice for Conducting Moist SO ₂ Tests [46]
B827-97	Standard practice for conducting mixed flowing gas environmental Tests [68]
B895-47	Standard guide for mixed flowing gas Tests for Electrical Contacts [69]
B810-01a	Standard method for calibration of atmospheric Corrosion Test Chambers by change in mass of Copper coupons [70]

Varios de los ensayos descritos en la tabla 3.2 no tienen mayor relación con las condiciones de servicio y por consecuencia con los fenómenos que conducen a la falla del equipo y dispositivos electrónicos. Sin embargo, han sido empleados como una extensión natural de la aplicación de dichas normas (B117, G85-85). Otras pruebas (G87-84) no presentan una buena correlación con el servicio real, son generalmente sobre-simplificaciones del ambiente con condiciones de exposición demasiado severas. En general su empleo se limita al análisis comparativo del comportamiento de materiales, dispositivos y recubrimientos.

La tendencia de mediados de los años 1970's a la fecha [16] ha sido el uso de combinaciones de gases corrosivos, algunas de éstas fueron desarrolladas por Schiff (1976), Potineche (1978), Ishino (1979), Altendorf (1979), Baron (1979), Freitag (1982) y Svedung y Johansson (1983).

Con esta base y considerando los estudios realizados por investigadores de los Laboratorios Battelle, Telcordia (Bellcore) y de IBM, los cuales realizaron pruebas con mezclas de gases pretendiendo acelerar el deterioro por corrosión atmosférica en equipo electrónico, la ASTM estableció una serie de métodos y procedimientos de ensayo [68, 69, 70, 71, 72, 73].

A fines de los años ochenta W. H. Abbott [62, 74, 75] propuso una serie de objetivos a cumplir por las pruebas aceleradas de corrosión, además de identificar los principales gases y sus efectos en la corrosión. En este trabajo [62] se clasifican los objetivos en técnicos y comerciales. Se considera que a menos de que éstos se cumplan los resultados obtenidos no se podrán relacionar con los datos de campo. Abbott plantea que todo procedimiento de prueba deberá reproducir la cinética, mecánica y química de la corrosión (objetivos científicos), así como reproducir resultados y ser verificable (objetivos técnicos).

Zakipour y Leygraf [16] evaluaron diferentes pruebas de laboratorio que simulan la corrosión en interiores para materiales de contactos eléctricos. Concluyeron la conveniencia de utilizar mezclas húmedas con SO₂, NO₂, NH₃ y H₂S. Tidblad y Leygraf [17] analizaron el efecto de SO₂, NO₂ y ozono en níquel y determinaron que éstos promueven la corrosión. Strandberg y Johansson [26] emplearon los mismos agentes contaminantes en cobre. Oesch y Faller [18] realizaron pruebas con ozono en combinación con SO₂, NO_x y determinaron que, además de ser un acelerador de la corrosión junto con otros contaminantes, es un fuerte agente corrosivo por sí solo.

No solo la ASTM ha propuesto métodos de ensayo, bajo la consideración de mezclas de gases, también los laboratorios Batelle (tabla 3.3), la Electronic Industries Alliance [76] (tabla 3.4), la Internacional Electrotechnical Commission [77] (tabla 3.5), la IBM y la Universidad de Maryland (tabla 3.6) han propuesto diversas metodologías para el desarrollo de pruebas con mezclas de gases.

Tabla 3.3 Pruebas estandarizadas por el Instituto Battelle.

Clase	SO ₂ (Pb.)	NO ₂ (ppbv)	Cl ₂ (ppbv)	H ₂ S (ppbv)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)
I						
II		200+ - 25	10	10	70+ - 2	30+ -2
III		200+ - 25	20+ - 5	100+ - 10	75+ - 2	30+ -2
IV		200+ - 25	50+ - 5	200+ - 10	75+ - 2	30+ -2

En el caso de los Laboratorios Battelle los ambientes operativos para el equipo electrónico se clasifican en cuatro niveles, de menos (clase I) a más corrosividad del medio (clase IV). Con la clase uno se consideran ambientes de oficina perfectamente controlados. La clase II se define como industrial ligero, al cual corresponden oficinas con atmósferas no controlados o en las que se cuenta con sistemas de reducida eficiencia. La clase III se define como ambiente industrial medio, tales como áreas de almacenamiento con pobres sistemas de aire acondicionado, por último, la clase IV corresponde con zonas adyacentes a fuentes primarias de contaminación atmosférica. En esta designación se considera que en un ambiente Clase I no existirá deterioro, por lo que no se define una condición de simulación. Las otras tres clases se definen a partir de

mezclas de Cl₂, H₂S, NO₂; en donde estos contaminantes se emplean en concentraciones crecientes. En algunos otros estándares se adiciona también el SO₂, al cual se le define un efecto sinérgico en combinación con el H₂S. Si bien es aceptado que no existe una relación de tiempo de ensayo vs. deterioro en campo, Williams [78] considera que, para las condiciones definidas por Laboratorios Battelle, dos días en la cámara equivalen a un año de exposición en campo.

La *Electronic Industries Association* definió sus parámetros de ensayo, así como las clases respectivas a partir de los resultados de Laboratorios Battelle, en donde las clases IIA y IIIA resultan simplemente de la adición de SO₂

Tabla 3.4 Condiciones de Ensayo propuestas por la Electronic Industries Association (EIA)

Clase	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	H ₂ S (ppb)	Cl ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)
I						
II	70+ - 2	30 + - 2	10 + - 5	10 + - 3	200 + - 50	
IIA	70+ - 2	30 + - 1	10 + - 5	10 + - 3	200 + - 50	100 + - 20
III	75+ - 2	30 + - 2	100 + - 20	20 + - 5	200 + - 50	
IIIA	70+ - 2	30 + - 1	100 + - 20	20 + - 5	200 + - 50	200 + - 50
IV	75+ - 2	40 + - 2	200 + - 20	30 + - 5	200 + - 50	

La *Internacional Electrotechnical Comission* (IEC) define 4 métodos, de los cuales el número uno se orienta al análisis del comportamiento de recubrimientos de oro (contactos), lo métodos 2 y 4 se orientan a dispositivos electrónicos empleados en ambientes característicos de centros de telecomunicaciones, cuartos de instrumentos y oficinas (con control de aire), por último el tipo 3 se aplica a casos de ambientes de agresividad superior, característicos de plantas industriales.

Tabla 3.5 Condiciones de prueba propuestas por la IEC.

Método	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	H ₂ S (ppb)	Cl ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)
1	25 + - 1	75 + - 3	100 + - 20			500 + - 100
2	30 + - 1	70 + - 3	10 + - 5	10 + - 5	200 + - 50	
3	30 + - 1	75 + - 3	100 + - 20	20 + - 5	200 + - 50	
4	25 + - 1	75 + - 3	10 + - 5	10 + - 5	200 + - 50	200 + - 20

En su propuesta Telcordia también toma como base las condiciones especificadas por los Laboratorios Battelle, donde simplemente orienta sus ensayos para ambientes interiores y exteriores. Por su parte IBM ha trabajado en el tema desde la década de los 1960's, para sus ensayos ha definido tres clases G1 (oficinas), G2 (industrial) y G3 (industrial pesado), en general IBM define concentraciones de los gases contaminantes muy diferentes de las propuestas por Battelle. Se considera que los métodos planteados por IBM están prácticamente en desuso.

Tabla 3.6 Otros condiciones de prueba con mezclas de gases

	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	H ₂ S (ppb)	Cl ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)
Telcordia interiores	30 + - 1	70 + - 2	10+ - 1.5	10+ - 1.5	200+ - 30	100+ - 15
Telcordia exteriores	30 + - 1	70 + - 2	100+ - 15	20+ - 3	200+ - 30	200+ - 30
IBM	30 + - 0.5	70 + - 2	40+ - 5%	3+ - 15%	610+ - 5%	350+ - 5%
Universidad de Maryland	25 a 50	20 a 95	10 a 1000	10 a 1000	10 a 1000	10 a 1000

3.6 CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES CON RESPECTO A SU GRADO DE CORROSIVIDAD.

Para predecir posibles fallas inducidas por corrosión en componentes o aparatos electrónicos, se han desarrollado diferentes sistemas de clasificación de la atmósfera con el objeto de predecir la corrosividad de un ambiente dado. Una de los procedimientos estándar más ampliamente establecido es el que ha adoptado la ISA (Instrument Society of America) [65]. Si bien los líquidos y los sólidos tienen una gran influencia en la corrosión en interiores, en la determinación de la corrosividad propuesta por ISA se ha dado mayor énfasis a la influencia de los gases. Los contaminantes incluidos en el estándar ISA son líquidos, sólidos y gases, con la subdivisión de los líquidos en vapor y aerosoles, y la división de sólidos por la dimensión de las partículas. El estándar tiene dos enfoques diferentes. El primero se basa en la exposición de muestras de cobre y el análisis cuantitativo subsecuente al ataque corrosivo, el segundo es la medición de la concentración de contaminantes y los parámetros climáticos. Se utiliza al cobre para definir el ambiente en el primer enfoque porque es un metal de uso común en la electrónica y porque su comportamiento ante la corrosión está influenciado por muchos gases corrosivos (tabla 3.7).

Tabla 3.7 Sensibilidad de los materiales a diferentes agentes corrosivos.

Corrosivo	Ag	Al	Latón	Bronce	Cu	Fe	Ni	Pb	Sn	Sold.	Acero	Zn	Roca
CO ₂ /CO ₃ ⁻²	B			B		M	B	M			M	M	
NH ₃ /NH ₄ ⁺	M	B	B	B	M	B	B	B	B	B	B	B	
NO ₂ /NO ₃ ⁻	N	B	M	M	M	M	M	M	B	M	M	M	B
H ₂ S	A	B	M	M	A	B	B	B	B	B	B	B	
SO ₂ /SO ₄ ⁻²	B	M	A	A	A	A	A	M	B	M	A	A	A
HCl/Cl ⁻	M	A	M	M	M	A	M	M	M	M	A	M	B
RCOOH/COOH-	B	B	M	M	M	M	M	A	B	B	M	M	
O ₃	M	N	M	M	M	M	M	M	B	B	M	M	M

A → sensibilidad alta, M → sensibilidad moderada, B → sensibilidad baja, N → no hay sensibilidad.

Casilla en blanco indica que no se sabe si se han hecho estimaciones experimentales.

De acuerdo al estándar, cada ambiente interior (dado que se considera que el equipo electrónico se encuentra en interiores) pertenece a una de cuatro clases de agresividad, etiquetadas como G1, G2, G3 y G4 (tabla 3.8), la corrosión del cobre relacionada con estas clases se determina a través de la exposición de probetas durante periodos comprendidos entre uno y doce meses, esto de acuerdo a las condiciones de agresividad de la atmósfera (mayores tiempos para atmósferas más

suaves o menos contaminadas). La cantidad de productos de corrosión formada se determina por reducción catódica.

Para cada clase de agresividad, el estándar ISA también brinda los niveles máximos para algunos gases corrosivos (tabla 3.9); Los datos se basan en la compilación de observaciones experimentales. Las clases de ambientes interiores que se definen de esta manera, toman como base los efectos corrosivos que provocan en el cobre, de acuerdo a la tabla 3.4, siempre y cuando la humedad relativa sea menor al 50%. Siguiendo la norma ISA, se considera que el ambiente incrementa en uno su nivel de agresividad si la humedad relativa aumenta en un 10%.

Tabla 3.8 Clasificación de corrosividad de acuerdo a la ISA, la columna izquierda contiene el nivel de corrosividad del ambiente, la columna central indica el espesor máximo de la capa de cobre corroída y la columna derecha describe las condiciones de la categoría. Todos los valores de espesor se refieren a un mes de exposición.

<i>Nivel de corrosividad</i>	<i>Grosor de la capa de cobre corroída (nm)</i>	<i>Descripción del nivel de severidad</i>
G1 Ligero	<30	La corrosión no es un factor que deba considerarse al determinar la confiabilidad.
G2 Moderado	30 a <100	Los efectos de corrosión son apreciables y pueden ser un factor para determinar la confiabilidad de un equipo.
G3 Agresivo	100 a <200	Existe alta probabilidad de que ocurra un ataque de corrosión. Se recomienda el empleo de controles ambientales que limiten la agresividad del ambiente (control del medio o empleo de equipo diseñado y empacado especialmente).
G4 Severo	>200	Sólo puede operar el equipo especialmente diseñado y protegido. El uso de equipo en esta clase es un problema que deberá de ser negociado entre el usuario y el fabricante.

Tabla 3.9 Máximas concentraciones de gases corrosivos de acuerdo a la clasificación ISA de corrosividad. Si los gases en distintos ambientes corresponden a diferentes niveles de corrosión, entonces el nivel global está determinado por el gas que tiene el nivel más elevado.

Nivel de corrosividad	Corrosivo gaseoso y máxima concentración en ppbv.			
	H ₂ S	SO ₂	Cl ₂	NO _x
G1	<3	<10	<1	<50
G2	<10	<100	<2	<125
G3	<50	<300	<10	<1250
G4	>=50	>=300	>=10	>=1250

La norma ISA se deberá considerar tan solo como una guía general para la predicción de la corrosividad del medio ambiente. La agresividad dependerá de efectos sinérgicos entre los contaminantes, la influencia de las propias superficies, así como de la acción catalizadora del ozono o del efecto de las radiaciones en el rango del ultravioleta, entre otras. Asimismo habrá que considerar la influencia de la temperatura, su variación, los contaminantes originados en la propias actividades humanas, los generados por la descomposición de los materiales, el

intercambio de aire, su velocidad y desde luego la humedad relativa. La experiencia ha demostrado que una clasificación de corrosividad basada en la exposición y el análisis de muestras de cobre o una combinación de metales, arroja resultados más confiables que una clasificación basada en las medidas de los gases corrosivos. No obstante, el estándar ISA puede ser una guía útil si se maneja con precaución.

3.7 MÉTODOS DE PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN EQUIPO Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Todos los componentes, dispositivos y equipos electrónicos se pueden proteger de una manera relativamente efectiva contra las fallas inducidas por corrosión, la aplicación de éstas medidas estará en función del uso del equipo, su grado de confiabilidad y el nivel de costos de protección que sea aceptable para el sistema. En particular los mecanismos más usuales de protección contra el medio ambiente se agrupan en:

a) Selección de materiales y diseño de componentes. Un análisis de las condiciones ambientales bajo las cuales se espera que funcione el equipo es parte esencial de las medidas preventivas. Toda condición predecible de cambio de las condiciones ambientales también deberá ser tomada en cuenta para la determinación de las medidas preventivas. Para esto se recomienda determinar antes y después de la instalación del equipo la corrosividad del ambiente, a través de esto se puede confirmar que el ambiente tiene el nivel de corrosividad para el que ha sido diseñado el equipo. Las mediciones se deberán realizar en las condiciones críticas, esto es la temporada de lluvias y en los días de mayor índice de contaminantes presentes en la atmósfera. Si bien este mecanismo es el más deseable es también evidente que las condiciones de operación, almacenamiento y transporte de equipo electrónico son muy variadas, siendo más demandante su resistencia al ambiente en los casos de equipo que va a funcionar en regiones tropicales o semitropicales, con un alto grado de contaminantes. Además habrá que considerar el efecto que el uso de compuestos, como son los supresores de incendio [60], agentes fumigantes [59], humos [66] o de propias las actividades antropogénicas, tienen en la agresividad de un ambiente, y por consecuencia en el deterioro de los equipos sometidos a éste.

Bajo la perspectiva antes planteada queda claro que la definición de una determinada corrosividad de la atmósfera es solo una primera guía en la determinación de los cuidados que deberán tenerse con el equipo para evitar su deterioro.

Por otra parte es también un hecho innegable que las contramedidas de protección del equipo bajo cualquier condición existen. Sin embargo, no siempre resulta factible su aplicación desde un punto de vista meramente económico, o en ocasiones no se realizan estudios que permitan describir las condiciones representativas de servicio.

Con base en la normativa definida por la ISA es factible definir que si el ambiente se clasifica como G1 no habrá mayores inconvenientes por corrosión, en ambientes de nivel G2 la confiabilidad y la vida de servicio de equipos y dispositivos electrónicos estará influida por el diseño y selección de los materiales, así como por la eliminación de fundentes u otros productos que favorezcan la corrosión. Por su parte en ambientes más corrosivos, como el G3 ó G4, es

conveniente aislar a los dispositivos del medio ambiente, evitando la circulación de aire a través de éstos.

La susceptibilidad de las unidades ensambladas puede estar fuertemente influenciada por la elección de ciertos parámetros de diseño. Las carcasas selladas y el encapsulamiento de los componentes permiten reducir en una gran cantidad de casos los niveles de contaminantes y humedad limitando así, en forma sensible, la problemática de la corrosión. En este punto habrá que considerar la calidad de los sellos así como el efecto que el envejecimiento de éstos puede tener en un posterior ataque. También en este caso es necesario considerar las condiciones que deberá reunir el equipo instalado a la intemperie (teléfonos públicos, decodificadores para señal de TV, entre otros) el cual debe de cumplir condiciones de hermeticidad en función de su grado de intemperismo.

El empleo de ventiladores para el enfriamiento de las tarjetas y circuitos da lugar a un incremento en la factibilidad de deterioro por corrosión, ya que el aire, al estar circulando a través de los dispositivos favorece la formación de depósitos de contaminantes y polvo (este último a su vez favorece la presencia de películas de humedad) en los componentes. Por su parte la aplicación de sistemas encapsulados puede presentar un efecto adverso a través de la liberación de vapores orgánicos que aceleren los fenómenos corrosivos. La formación de condensado al interior de encapsulados y carcasas puede ser causa importante de deterioro del sistema. Dado que la presencia de condensados es favorecida por bajas temperaturas superficiales, es entonces que un incremento de la temperatura superficial de los dispositivos se traduce en la disminución del ataque corrosivo. El uso de papel y cartón como elementos de empaque también debe ser revisado ya que éstos pueden contener pequeñas cantidades de H_2S , situación que se traduce en un incremento de la agresividad del ambiente, éste tipo de situaciones se vuelve más problemática en sistemas sellados o con una pobre ventilación.

b) Inconvenientes generados en el ensamble y la manufactura. Durante el ensamble y la manufactura de equipo electrónico se puede dar lugar a inconvenientes que se manifiesten más adelante en corrosión de los dispositivos. Los residuos de los fundentes empleados para la soldadura o de los procesos de limpieza (sales o químicos limpiadores) ocasionalmente quedan en componentes y tarjetas favoreciendo el ataque de éstas. Por lo tanto es esencial la limpieza cuidadosa de los componentes y unidades ensambladas. Así como el control del ambiente durante el almacenaje previo al ensamble, en particular a las operaciones de soldadura.

c) Inconvenientes generados durante el transporte, almacenamiento e instalación. Durante estas etapas logísticas las condiciones ambientales pueden ser significativamente diferentes de otras fases de la vida de servicio del equipo y dispositivos electrónicos. Para equipo empleado en ambientes con temperatura y humedad controlada, la etapa más demandante está representada por su almacenamiento y transporte. Las precauciones necesarias para minimizar los efectos de corrosión incluyen diversos principios como pueden ser empaques (bolsas) selladas herméticamente, empleo de desecantes (silica gel) o inhibidores de fase vapor. Estos inhibidores sean desecantes o de fase vapor deben ser eliminados al instalarse el equipo, para evitar así problemas producto de la contaminación que éstos mismos puedan generar.

Todo lo comentado permite concluir que si bien los problemas de corrosión en equipo electrónico representan graves inconvenientes, sobre todo en aquellos equipos y sistemas instalados en condiciones típicas de países como México, en la gran mayoría de las ocasiones no se da importancia a estos problemas, de tal forma que cuando suceden ni siquiera se conceptualiza la raíz de las fallas, presentándose así un círculo vicioso el cual es necesario eliminar.

Capítulo 4. Estudio del deterioro de equipo electrónico en México

4.1 . CONCEPTOS GENERALES

La mayor parte de los estudios publicados, relacionados al deterioro que por corrosión sufren los equipos y dispositivos electrónicos, se han orientado a las condiciones encontradas en países desarrollados [6,8,16,35,39,54], en particular EUA, Canadá y la Unión Europea. Los cuales representan el mayor porcentaje de consumo de productos electrónicos. Sin embargo, la importancia que la electrónica tiene es innegable, razón por la que existe un porcentaje, cada día creciente, de equipo- en todo el espectro tecnológico- que es puesto en servicio en países en vías de desarrollo o de las llamadas economías emergentes.

Las condiciones climáticas en los países desarrollados (localizados por arriba del paralelo 30 de latitud norte), son sensiblemente diferentes a las típicas de las economías emergentes (temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, precipitación fluvial), así mismo los índices de contaminación (concentraciones de NO_x, SO₂, CO₂, H₂S, NH₃, O₃, entre otros), lo cuales, en general, son más agresivos. Los mayores índices de contaminación se presentan en general en megaciudades del tercer mundo (figura 4.1, tabla 4.1).

Dadas las variaciones climáticas, características de las regiones ubicadas al norte del paralelo 30, en éstas es común el empleo de sistemas de acondicionamiento de aire, situación que atenúa sensiblemente la agresividad de las atmósferas interiores [35,39]. Por su parte, en los países en vías de desarrollo, no es extensivo el empleo de instalaciones de aire acondicionado. Además en estos casos existe un importante intercambio de aire con el exterior, situación que se traduce en características mucho más agresivas de la atmósfera en la cual se encuentra instalado el equipo electrónico.

Todas estas circunstancias dan como resultado que muchas de las conclusiones y definiciones que se han desarrollado para la instalación de equipo y dispositivos electrónicos en países desarrollados no apliquen para las situaciones características de países como México. Es por tanto necesario realizar los estudios que permitan definir el deterioro característico para las condiciones medio ambientales de las diversas regiones de México.

Los métodos basados en la presencia de algunos contaminantes para la determinación del deterioro, así como en la evaluación de la agresividad del medio, no necesariamente son la mejor opción para definir la corrosión que sufre el equipo electrónico por efecto de su medio ambiente. Por lo tanto es necesario definir metodologías *ad hoc* que permitan determinar las peculiaridades del deterioro, los principales contaminantes, el efecto que las características constructivas del equipo tienen, así como los dispositivos que mayor daño presentan.

Tabla 4.1 Índices generales de contaminación del aire en las 20 ciudades más pobladas del planeta [79]

<i>Calidad del aire en 20 Ciudades</i>				
	SO ₂	CO	NO ₂	O ₃
Bangkok	1	1	1	1
Beijing	3	*NEDD	1	2
Bombay	1	1	1	NEDD
Buenos Aires	NEDD	NEDD	NEDD	NEDD
Cairo	NEDD	2	NEDD	NEDD
Calcuta	1	*NEDD	1	NEDD
Delhi	1	1	1	NEDD
Jakarta	1	2	1	2
Karachi	1	*NEDD	*NEDD	NEDD
Londres	1	2	1	1
Los Angeles	1	2	2	3
Manila	1	NEDD	NEDD	NEDD
Cd. de México	3	3	2	3
Moscú	NEDD	2	2	NEDD
Nueva York	1	2	1	2
Río de Janeiro	2	1	NEDD	NEDD
Sao Paulo	1	2	2	3
Seúl	3	1	1	1
Shanghai	2	NEDD	NEDD	NEDD
Tokio	1	1	1	3

Contaminación muy severa [3]
 Contaminación severa [2]
 Contaminación moderada [1]
 No existen datos disponibles [NEDD]

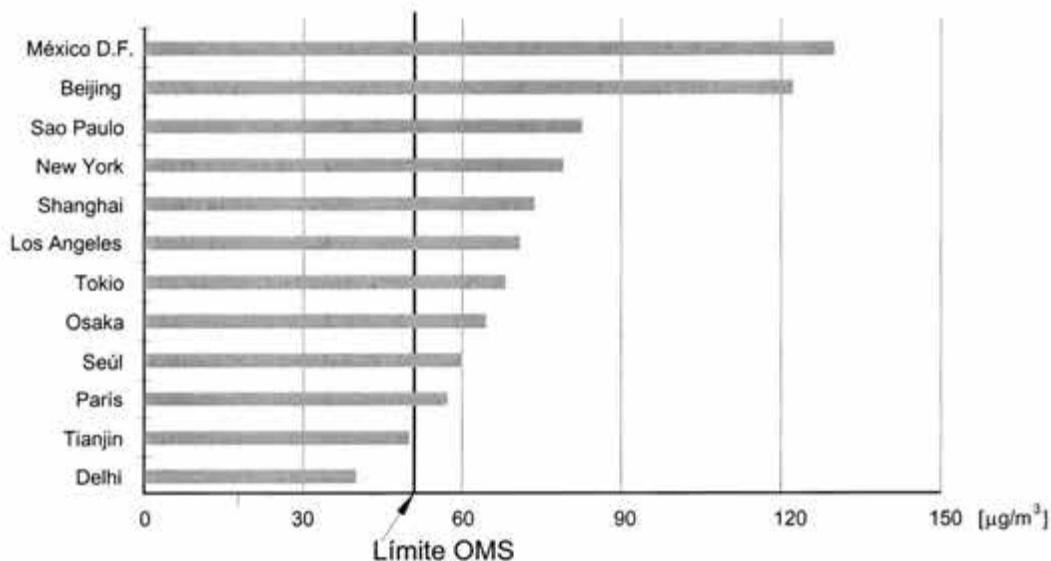


Figura 4.1 Concentración media anual (1995) de NO₂ para ciudades con más de 9 millones de habitantes [80].

Considerando lo anterior se definió la conveniencia de estudiar un dispositivo o equipo estándar, el cual pudiera estar instalado bajo las condiciones más diversas, de preferencia, que éste fuera de un modelo específico, producido por una planta de referencia. Con lo anterior se puede garantizar que las patrones empleados para el ensayo son consistentes, ya que las muestras a evaluar son equivalentes. De lo anterior se concluyó que un elemento que se encuentra en todas las regiones del país y el cual proviene de un solo productor, para el caso de México, eran los aparatos telefónicos de uso doméstico (hasta el año 2000, y de acuerdo con la políticas comerciales de Telmex, existía un número limitado de modelos de aparatos telefónicos, producidos por Alcatel Indetel, los cuales eran instalados al momento de establecer la conexión al sistema). Al provenir de un solo productor se garantiza que los controles de calidad del elemento a estudiar sean los mismos. Aún en el caso de trabajar con diferentes modelos de aparatos telefónicos es factible considerar que muchas de las partes son similares, lo cual permite su análisis comparativo. En la figura 4.2 se presenta una tarjeta impresa típica de un teléfono de uso residencial.

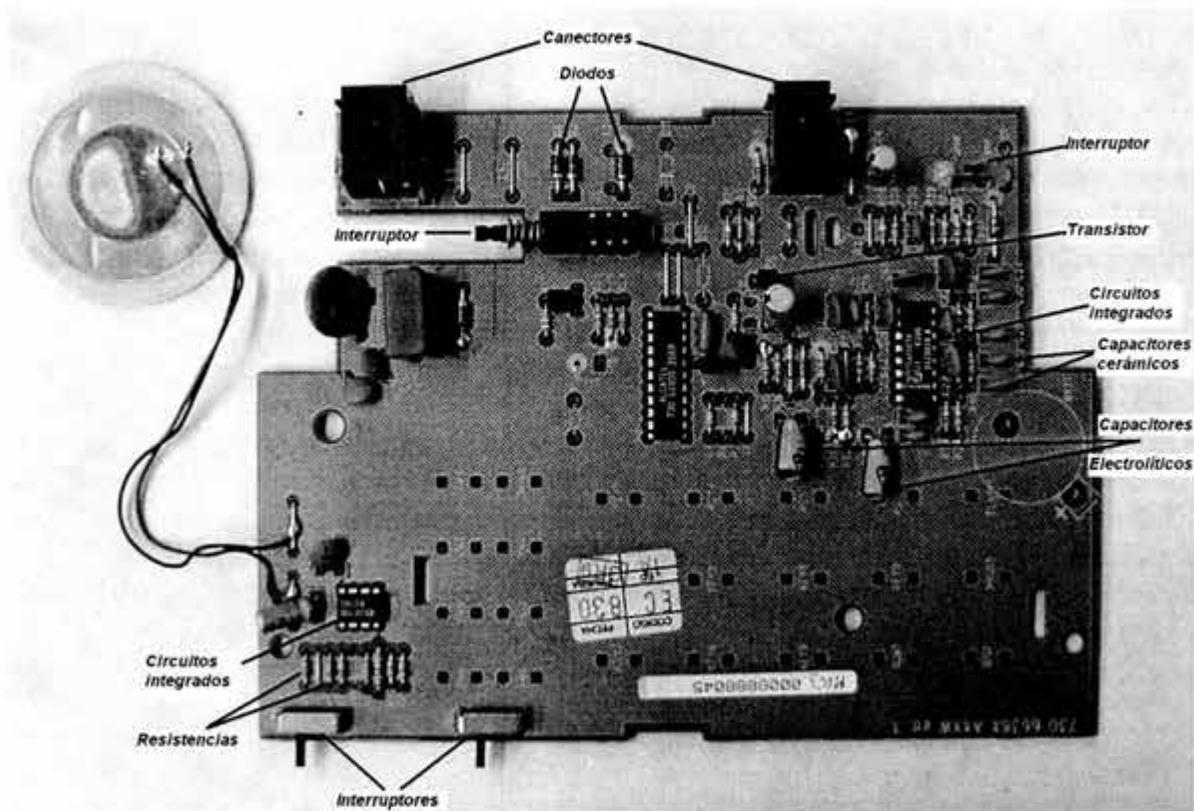


Figura 4.2 Tarjeta impresa típica de aparatos telefónicos de uso residencial.

Una vez definido el elemento patrón (aparatos telefónicos de uso residencial) sobre el cual se realizará el estudio se procedió a definir las localidades de las cuales provendrán los respectivos especímenes. Para esto se consideró la clasificación climática [9], el mapa de corrosividad atmosférica [2], los datos de las estaciones de monitoreo del aire publicados [81], así como los datos del INEGI [82].

Definida la muestra sobre la cual se realizará el estudio, es necesario proponer la metodología que permita obtener conclusiones en cuanto al deterioro que sufre el equipo y dispositivos electrónicos bajo las diversas corrosividades características de México [2].

Considerando los parámetros que mayor influencia tienen en la corrosión atmosférica [2,17,18,] y en particular en el deterioro del equipo electrónico [4,6,7,8,35,62], de la definición de los diferentes tipos de atmósferas y tomando en cuenta los climas que principalmente se encuentran en México, se definieron las localidades de las que se capturarían los especímenes (tabla 4.2). Para esto también se consideró la factibilidad de contar con los datos climáticos (figuras 4.3, 4.4, 4.5) y de los contaminantes de la región (datos de estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos). En este punto es conveniente mencionar que en México solo se realizan estudios consistentes, de calidad del aire, en 14 ciudades (figura 4.6).

Dada la variabilidad que se puede tener en las diferentes localidades, los tiempos requeridos para el estudio de cada muestra (tarjeta del aparato telefónico) y con la finalidad de garantizar la confiabilidad en los datos obtenidos se analizaron lotes de 3 a 7 aparatos para cada una de las localidades seleccionadas.

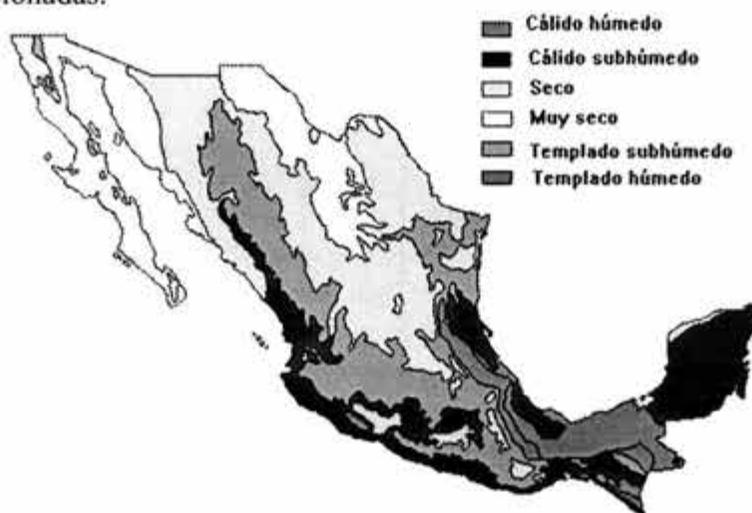


Figura 4.3 Distribución Climática en la república mexicana [79]

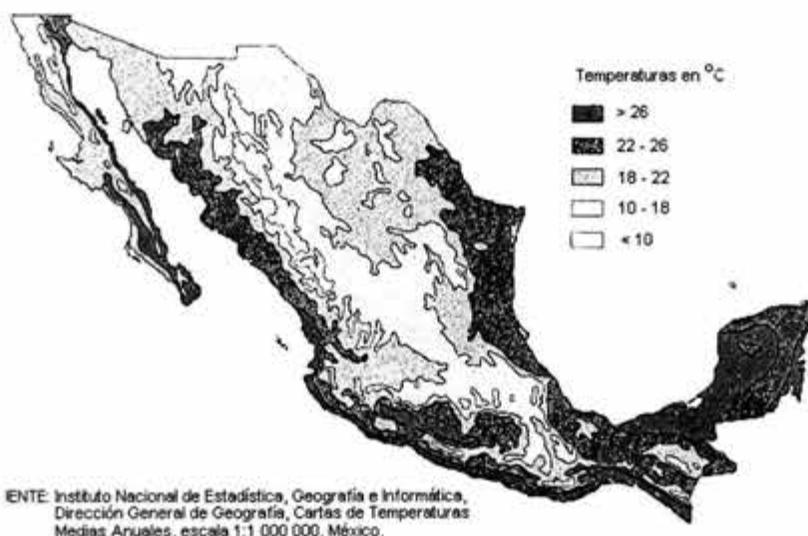


Figura 4.4 Temperatura media anual [79]

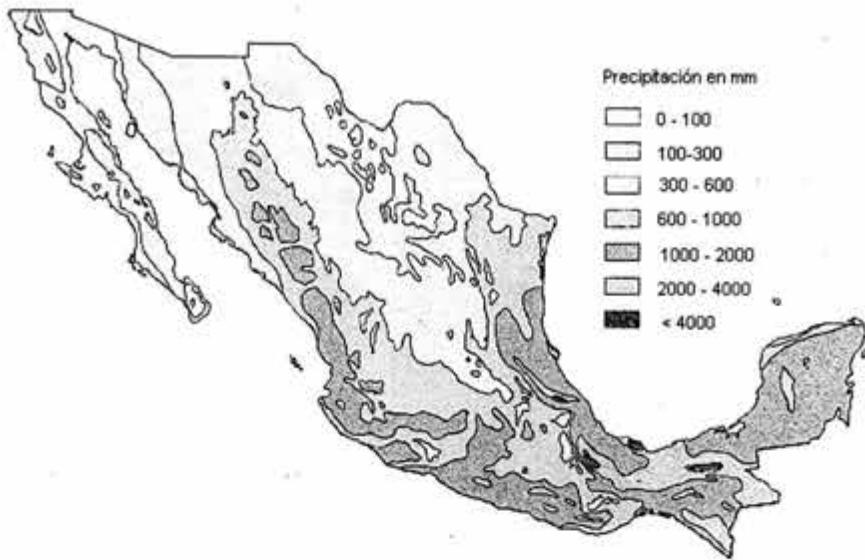


Figura 4.5 Precipitación anual [79]

Monitoreo de la calidad del aire en México		
Ciudad	Núm de habitantes	Parque vehicular
ZMVM (1)	15,400,000	2,720,000
Toluca (2)	1,000,000	225,000
Tijuana (3)	950,000	307,000
S. L. Potosí (4)	700,000	140,000
Querétaro (5)	1,200,000	121,000
Nacozari (6)	20,000	*
Monterrey (7)	2,600,000	645,000
Mexicali (8)	500,000	238,000
Manzanillo (9)	90,000	15,000
Guadalajara (10)	1,700,000	-----
Coatzacoalcos (11)	280,000	-----
Ciudad Juárez (12)	1250,000	-----
Cananea (13)	33,000	-----
Aguascalientes (14)	650,000	-----

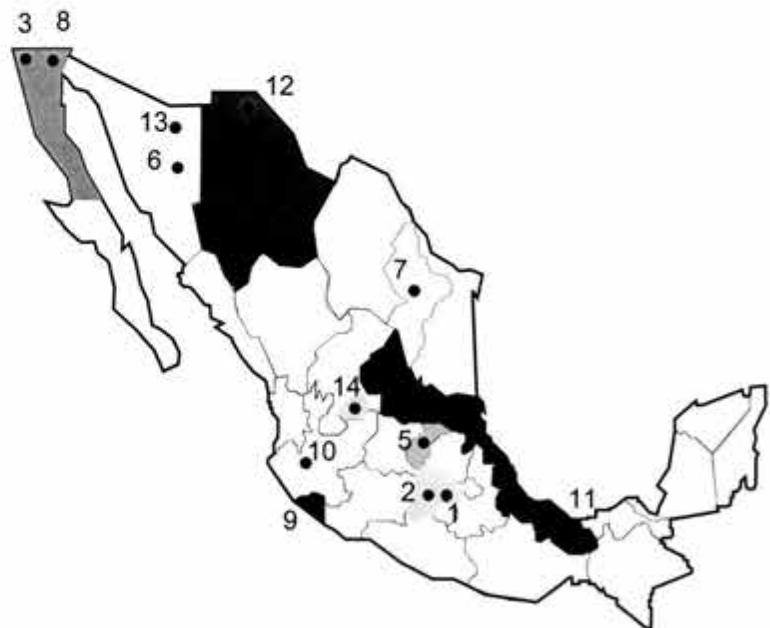


Figura 4.6 Ciudades con monitoreo de la calidad del aire en México

4.2 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL DETERIORO DE EQUIPO Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Como condición primordial para el desarrollo del presente estudio fue necesario definir una metodología para la determinación del grado de deterioro de equipo y dispositivos electrónicos (figura 4.7). Consistió en la inspección de tarjetas a 1X y 30X (estereomicroscopio), con la finalidad de determinar diferencias en el grado de deterioro en los diversos componentes, permitiendo así la construcción de mapas de corrosión o ataque. Definidas las zonas críticas se procedió a seccionarlas para su inspección con auxilio del microscopio electrónico de barrido (SEM), así como para la caracterización de los depósitos formados, esto mediante EDS (energy dispersive X-ray spectrometry). Lo anterior permitió definir los contaminantes críticos para cada condición y dispositivo bajo estudio (conectores, interruptores, batería, potenciómetros). Esta técnica si bien resultó muy demandante en tiempo y recursos de microscopía electrónica, permitió definir con relativa precisión los contaminantes que mayor efecto tienen en el deterioro del equipo y dispositivos electrónicos, esto de acuerdo a la región y peculiaridades de empleo.



Figura 4.7. Metodología de estudio de las tarjetas electrónicas provenientes de equipo telefónico de uso residencial

Tabla 4.2 Características climatológicas de las zonas geográficas para las cuales se analizó el deterioro de teléfonos de uso residencial

<i>Localidad</i>	<i>Ubicación [79]</i>	<i>Características climatológicas [9]</i>	<i>Tipo de Atmósfera</i>	<i>Contaminantes presentes</i>
<p>Área Metropolitana de la ciudad de México.</p> <p>Se trata de una de las zonas urbanas más contaminadas del planeta.</p>	19°23' latitud norte, 99°10' longitud oeste	<p>Dada la extensión territorial de la zona metropolitana de la Ciudad de México, a ésta se asocian diversos microclimas los cuales van del BS (seco o árido) al Cb(w) (templado subhúmedo con lluvia en verano</p> <p>Temperatura promedio 16.5 °, con precipitaciones que van de 570 a 1100 mm</p> <p>220 a 2400 m SNM</p> <p>Humedad relativa variable con la estación (33 a 89).</p>	<p>De acuerdo a las zonas y considerando las fuentes emisoras este concepto también varia, pero en general se puede definir como Urbano.</p> <p>La principal zona de generación de contaminantes se encuentra en el norte, con vientos dominantes N, NW, S, SE dependientes de la estación</p>	<p>Se trata de una de las ciudades más contaminadas del planeta , en general las concentraciones de NO_x, CO₂, y SO₂ son importantes.</p>
Cocoyoc-Oaxtepec, Morelos	18°54' latitud norte, 98°58' longitud oeste	<p>C(w) Templado subhúmedo, con lluvias en verano</p> <p>Temperatura promedio anual 21.9°C, precipitación 900 mm</p> <p>1385 m SNM</p>	Rural	Propio de las prácticas agrícolas características de la región.
Cuernavaca, Morelos	18°55' latitud norte, 99°44' longitud oeste	<p>Se presentan dos microclimas, Templado subhúmedo con lluvias en verano C(w2), parte norte y semicálido subhúmedo con lluvias en verano C(w1).</p> <p>20.7 °C, 1146 mm.</p> <p>1529 m SNM</p>	Urbano	Con la presencia de contaminantes característicos de las fuentes móviles
Bahía de Banderas (Estados de Jalisco y Nayarit)	20°37' latitud norte, 105°14' longitud oeste	<p>A(w1), Caliente subhúmedo con lluvias en verano,</p> <p>Temperatura media anual 26°C, precipitación pluvial 1430 mm</p> <p>2 m SNM</p>	Marino	Contaminantes característicos de la costa (Cloruros), adicional a lo cuales se considera la presencia de productos de la actividad agrícola.
Coatzacoalcos, Veracruz	18°09' Latitud norte, 94°25' Longitud oeste	<p>Condiciones Am Caliente húmedo con lluvias en verano, las cuales son muy próximas al Af Caliente húmedo con lluvias todo el año. 25.4 °C de temperatura media anual, precipitación 2780 mm, 14 m SNM</p>	Marino-Industrial	Las condiciones de salinidad en combinación con la elevada humedad relativa y las emisiones producto de la industria petroquímica ahí instalada transforman a este punto en uno de los de mayor índice de corrosividad atmosférica en el país.
Tampico, Tamaulipas	22°16' latitud norte, 97°47' longitud oeste	<p>A (wa) Caliente subhúmedo, con lluvias en verano</p> <p>24.2 °C, 989 mm de precipitación anual</p> <p>12 m SNM</p>	Marino-Industrial	Se caracteriza por la presencia de los contaminantes típicos de una atmósfera marina, a la cual se debe adicionar los contaminantes generados por la actividad de la industria pesada en la zona.

Tabla 4.3 Descripción del equipo sobre el cual se realizó el estudio

Clave de identificación	Localidad de procedencia	Descripción de Zona de servicio	Años de servicio	Atmósfera
TAT-2	Tampico	Casa habitación	Menor a 1 año	Industrial-Marino
TAT-3	Tampico	Casa habitación	Menor a 1 año	Industrial-Marino
TAT-4	Tampico	Casa habitación	Menor a 1 año	Industrial-Marino
CUM-0	Cuernavaca	Casa habitación	10	Urbana
CUM-1	Cuernavaca	Casa habitación	10	Urbana
CUM-2	Cuernavaca	Casa habitación	14	Urbana
CUM-4	Cuernavaca	Casa habitación	6	Urbana
MP-0	México	Oficina	Menor a 1 año	Urbana
MP-1	México	DEPTO.	8	Urbana
MP-2	México	DEPTO.	7	Urbana
MP-3	México	Oficina	6	Urbana
MO-4	México	Oficina	6	Urbana
MO-5	México		10	Urbana
MS-6	México	Casa habitación	15	Urbana
MS-7	México		6	Urbana
MS-8	México	Oficina		Urbana
BBN-0	Bahía de B. Nay.	Casa hab.	8	Rural
BBN-1	Bahía de B. Nay.	Casa hab.	9	Rural
BBN-2	Bahía de B. Nay.	Casa hab.	4	Rural
BBN-3	Bahía de B. Nay.	Casa hab.	5	Rural
PVJ-0	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-1	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-2	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-3	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-4	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-5	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-6	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-7	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-8	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
PVJ-9	Puerto Vallarta	Hotel (A.A.)	5	Marino
COV-0	Coatzacoalcos	Hotel (A.A.)	3	Industrial-Marino
COV-1	Coatzacoalcos	Hotel (A.A.)	3	Industrial-Marino
COV-2	Coatzacoalcos	Casa Habitación (A.A.)	3.5	Industrial-Marino
COV-3	Coatzacoalcos	Casa Habitación (A.A.)	4	Industrial-Marino
COV-4	Coatzacoalcos	Casa Habitación	2	Industrial-Marino
COV-5	Coatzacoalcos	Casa Habitación	3	Industrial-Marino
COV-6	Coatzacoalcos	Casa Habitación	2	Industrial-Marino

El análisis de las tarjetas y la determinación de las características del deterioro permiten, aplicando la metodología de análisis de falla [83], proponer mejoras que garanticen una disminución del deterioro, a la vez de definir las condiciones atmosféricas críticas para el equipo electrónico. Lo anterior para climas tropicales y subtropicales.

Asimismo los resultados también sirvieron para contrastar con lo observado a partir de los especímenes que fueron sometidos a ensayos acelerados de deterioro (capítulos 5 y 6). Como más adelante se comenta, de lo obtenido se constata que la metodología propuesta, garantiza una simulación acelerada del deterioro que se da durante la exposición atmosférica del equipo y dispositivos electrónicos.

La metodología empleada permite analizar el deterioro que sufren los dispositivos en un ambiente real bajo condiciones sin control. Esto en contraste con los datos obtenidos en pruebas de laboratorio. Los resultados permiten definir algunas modificaciones en el diseño y la manufactura para favorecer el rendimiento del dispositivo como consecuencia de evitar el deterioro ambiental. Asimismo éstos representan una muestra evidente de la importancia que las condiciones climáticas y la agresividad del medio tropical o subtropical tienen en comparación de los climas fríos y templados.

Del análisis de deterioro se constata la agresividad de las atmósferas interiores para un país como México, el cual se puede considerar como ejemplo típico de las condiciones económicas y de medio ambiente de las economías emergentes. Considerando los datos relativos a ventas de equipo de aire acondicionado así como los de los censos económicos se puede afirmar la limitada difusión en el empleo de estos equipos y por consecuencia confirmar que el nivel de contaminantes en interiores es del mismo orden que el de exteriores con la adición de los productos característicos de la actividad humana, así como de la descomposición de los diversos materiales que es común encontrar en interiores como parte integral de alfombras o cortinas. En el caso de ambientes tropical y subtropical estas diferencias son mucho menores. En estos casos la condensación reemplaza a la lluvia en los tiempos de humectación con el inconveniente adicional de no generar lavado de la superficie, lo que se traduce en una mayor concentración de contaminantes.

Los trabajos publicados normalmente refieren la corrosividad del ambiente, tanto en exteriores como en interiores, a partir de pruebas de larga duración realizadas en laminillas metálicas (cupones). Sin embargo, las condiciones en que se desarrollan los mecanismos de corrosión en éstas poco o nada tienen que ver con lo que sucede al nivel de un dispositivo o tarjeta electrónica, lo cual vuelve necesario el estudio de éstos elementos para poder generar conclusiones que sean directamente aplicables.

La problemática del deterioro ambiental en equipo electrónico se debe, además de la compleja interacción de los factores que en ésta intervienen, a que en la mayoría de los casos, no existe ninguna documentación causa-efecto situación que en el análisis presentado es detallada.

Procedimiento para la elaboración de los mapas de deterioro.

Todos los aparatos, una vez desarmados, fueron revisados a simple vista. Esto en lo que se refiere a sus conexiones y tarjetas, para posteriormente realizar una detallada inspección con el estereoscopio. Los elementos con aparente deterioro (formación de depósitos) fueron inspeccionados por microscopía electrónica, y los depósitos se analizaron por EDS.

Para facilitar la interpretación de los resultados se diseñaron mapas de deterioro (figura 4.8), definiéndose cinco niveles de ataque en los componentes:

1. Depósito ligero de solución o de sales sin evidencia de corrosión
2. Depósito importante de solución o de sales sin evidencia de corrosión
3. Leve evidencia de corrosión
4. Presencia de productos de corrosión, abundantes picaduras, presencia indiscutible de fenómenos corrosivos
5. Daños importantes debidos a la corrosión, la integridad de los elementos es afectada en forma notoria.

Los niveles 1 y 2 no significan la existencia de daños por corrosión pero si representan una situación previa al ataque, del nivel 3 al 5 existe corrosión, representando este último una condición inminente de falla.

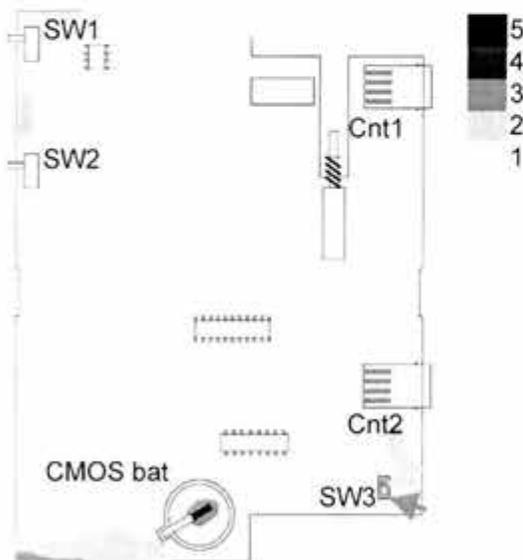


Figura 4.8 Mapa de deterioro típico para una tarjeta impresa de un teléfono de uso residencial

4.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL DETERIORO OBSERVADO EN TARJETAS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Para el desarrollo de este estudio se partió de la premisa de que la tarjeta electrónica de un teléfono es representativa de cualquier sistema electrónico, ya que consiste de un circuito impreso al que están ensamblados diversos componentes (microcircuitos, resistencias, inductancias y capacitancias) conectadas a través de las pistas de la tarjeta. En estos dispositivos se encuentran presentes una serie de metales (Cu, Al, latón, etc) y recubrimientos (Sn, Au, Ni, Ag).

En todos los casos estudiados los recubrimientos y soldadura de estaño no presentaron deterioro, se concluye en que las condiciones de exposición dan lugar a la formación de capas de pasivación. Esto se interpreta a través del comportamiento del elemento, generando en presencia de cloruros, depósitos que afectan la soldabilidad pero que no se traducen en mayores daños. En general las resistencias, capacitancias e inductancias no mostraron importante deterioro.

Dadas las limitaciones inherentes al empleo del EDS se analizó, en los productos de corrosión, la presencia de compuestos de azufre, cloro y oxígeno. El efecto del ozono y los óxidos de nitrógeno (NOx) no pudieron ser comprobados.

Análisis de las muestras provenientes de Tampico

Los teléfonos provenientes de Tampico se encontraban en operación al ser retirados de servicio. En todos éstos se habían presentado fallas intermitentes sin que se hubieran determinado las causas de las mismas. La intención de retirarlos de servicio fue determinar las razones de la problemática.

Los aparatos bajo estudio corresponden al mismo modelo y estuvieron en servicio durante un periodo de entre 3 y 12 meses.

De la inspección se observó:

- a. Los mapas de deterioro son coincidentes.
- b. Las tarjetas dan muestra de escurrimiento de líquido.

Los patrones de escurrimiento son similares a lo que se podría observar si en las tarjetas se derramara una solución acuosa. Dado que los teléfonos bajo estudio eran de diferente procedencia, se concluye que la posibilidad de que éstos hubieran sufrido el derrame de algún líquido no existe. Por lo que los patrones observados solo pueden ser producidos por escurrimiento del condensado que se forma en la tarjeta durante su servicio, situación que a su vez provoca problemas de operación (razón de su retiro).

La formación de condensado representa la primer etapa del proceso corrosivo, por lo que se puede afirmar que la presencia de fallas, producto del deterioro, era solo cuestión de tiempo.

Es conveniente mencionar que la formación de una capa de condensado sobre la tarjeta se confirmó al trasladar y probar estos equipos en la ciudad de México (la cual se caracteriza por una humedad relativa mucho más baja que la de Tampico), condición bajo la cual no se observó ninguna falla en los aparatos. Fue necesario someter éstos a un ambiente de alta humedad relativa para que se presentaran de nueva cuenta las fallas intermitentes.

El diseñador y fabricante de los aparatos, como un método, para poder definir acciones correctivas buscó en principio reproducir los inconvenientes reportados, por tal motivo se procedió a probar en una cámara de niebla salina durante 168 h. aparatos del mismo modelo. Al terminar la prueba se encontró que las características y patrones de deterioro no tenían ninguna relación con lo observado en los aparatos provenientes de campo. En éstos se detectó que el

mayor deterioro se presenta en la jaula de Faraday (acero galvanizado) del aparato. De tal situación se concluye en el inconveniente de realizar ensayos que no tienen relación alguna con las condiciones de exposición en campo, situación que es común en esta industria, dado que su *expertise* es en el área de diseño y manufactura del equipo electrónico, y no en la de mecanismos de deterioro o ingeniería de corrosión.

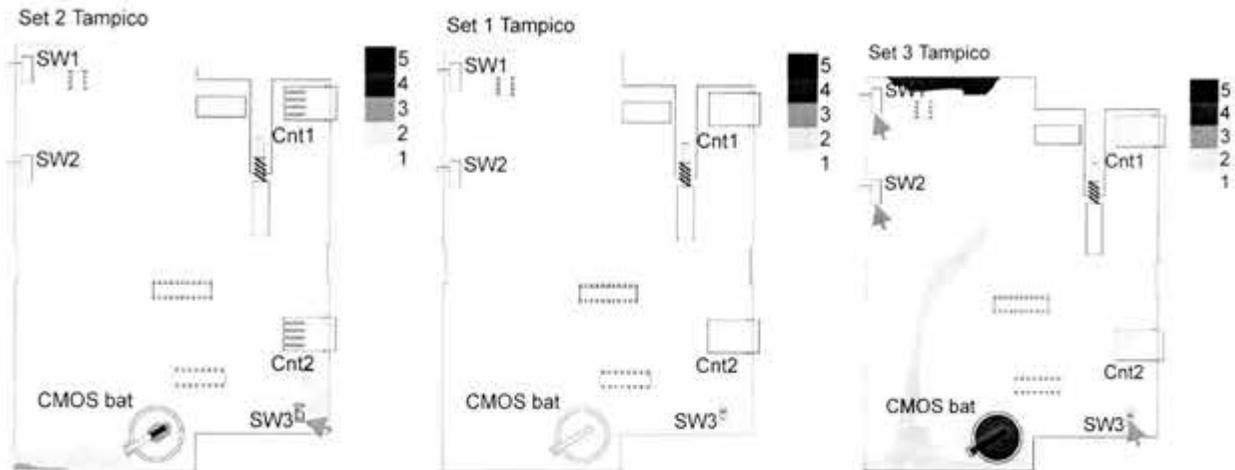


Figura 4.9 Mapas de deterioro de las tarjetas correspondientes a los teléfonos provenientes de Tampico. SW Se refiere a interruptores, CMOS bat. A la batería de la memoria del teléfono y CNT a contactos de cobre recubiertos con níquel, y con un recubrimiento parcial de oro, esto en una base de PVC.

Del análisis detallado de las tarjetas se tiene:

- a. En los interruptores (figura 4.10) se combinan una celda galvánica con una zona de acumulación de agua. Aquí existe una reducida separación entre la carcasa (acero cromado), y la manija del interruptor. El electrolito se acumula fácilmente en el agujero de la carcasa, generando una celda entre el cromo del recubrimiento y el propio acero, dando lugar al deterioro de la carcasa, pero no de las partes interiores del interruptor. La solución propuesta a este inconveniente reside en la eliminación del cromado de la parte, o en su defecto la sustitución por una pieza de plástico.

Es notable que en el interior de las carcasas, la corrosión sea mucho menos pronunciada que la de piezas expuestas directamente a la atmósfera. Esto se encontró válido generalmente, mostrando que aun dentro del teléfono, existen gradientes de contaminación y que el empaque puede prevenir la corrosión de piezas sensibles, aun cuando éste no sea totalmente hermético.

- b. Otro ejemplo importante de la corrosión galvánica es la que se produce por el empleo de recubrimientos de oro. Dado que este elemento es el metal más noble, forma celdas galvánicas en contacto con cualquier otro metal. Se observó que la corrosión por debajo de los recubrimientos de oro en combinación con sustratos de níquel y cobre, es usual dado que el oro aplicado de manera electrolítica tiende a ser poroso. Esta observación confirma los resultados de otros estudios publicados [4,6]. Estos mismos efectos se detectaron en especímenes sometidos a diferentes características atmosféricas.



Figura 4.10 Carcaza de interruptor, es evidente la existencia de depósitos provocados cuando el electrolito se acumula en la zona troquelada, dando lugar a la presencia de un par galvánico

- c. Otro inconveniente se presenta en el broche de sujeción de la pila de la memoria. En este caso se manifiesta deterioro entre éste y la jaula de Faraday del aparato. El problema se debe a la combinación de un diseño desafortunado (en cuanto a la geometría) del elemento de sujeción de la pila de la memoria, con la alta humedad relativa característica de la zona (figura 4.11a). En este caso la forma del clip (figura 4.11a) favorece la presencia de condensado, el cual en combinación con la diferencia de materiales del broche (acero estañado), de la carcaza de la pila (acero inoxidable) y de la jaula de Faraday (acero galvanizado); lo que se traduce en un rápido deterioro de la lámina galvanizada, así como inconvenientes en la carcaza de la propia batería (figura 4.12). Una posible solución del problema se presenta en la figura 4.11b, en la cual se propone modificar la curvatura del broche para evitar la formación de condensado.

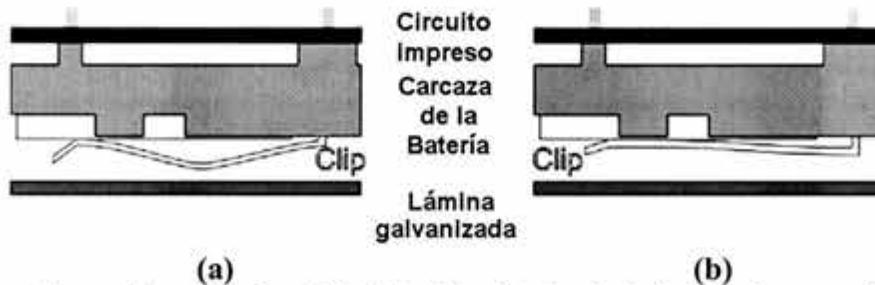


Figura 4.11 Se puede apreciar el diseño original (a) del sujetador de la batería de memoria del teléfono. La curvatura del clip favorece la presencia de condensado y provoca corrosión galvánica entre el recubrimiento del clip (estaño), y el de la lámina (zinc). En este caso con una modificación (b) en la pieza se puede limitar el problema

Los compuestos orgánicos volátiles (VOCs) juegan un papel importante en la química de los NO_x . La remoción de ozono y NO_x de la atmósfera puede ocurrir a través de la formación de ácido nitroso en los procesos nocturnos del NO_x (reacciones controladas) Si los VOCs controlan las reacciones, el ozono y el NO_x son retirados a través de la formación de peróxido de hidrógeno, que es absorbido en la fase acuosa y cataliza la oxidación de ión sulfito a ión sulfato. Los procesos diurnos son relacionados con la luz solar. Por lo que se espera que éstos sean más importantes en zonas tropicales y subtropicales con un mayor índice de insolación que en las

regiones al norte del trópico de Cáncer. En particular para el caso de Tampico, donde los VOCs son abundantes, se puede suponer que la combinación de procesos diurnos y nocturnos pueden provocar la mezcla particularmente corrosiva de ácido nítrico y sulfúrico en solución acuosa durante la fase de condensación del atardecer. En un ambiente con una mayor concentración de NO_x , como es el caso del área metropolitana de la ciudad de México la situación es menos consistente pues es muy probable que ocurra una alta acidificación de capas de condensado a través de otros mecanismos.

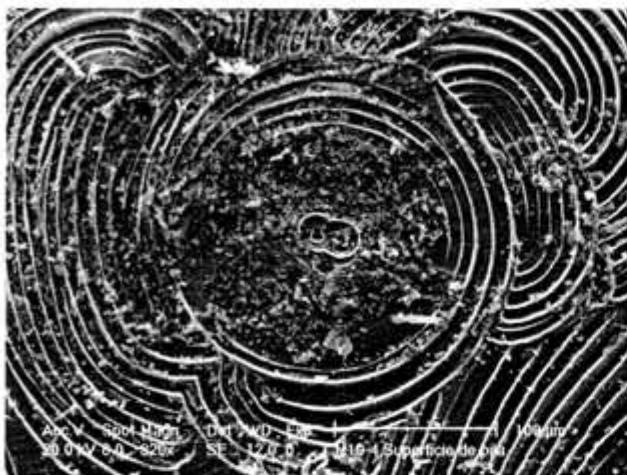


Figura 4.12. Patrones de corrosión (cloruros) en la carcasa de la batería de la memoria del aparato telefónico

En las muestras provenientes de Tampico se encontró que, a diferencia de lo que se podría haber supuesto originalmente, el cloro está presente en niveles por encima del límite detectable sólo en la lámina galvanizada. Solo en el caso de las picaduras formadas en el centro del patrón circular de corrosión de la batería de memoria de Tampico (figura 4.12) se detectó un elevado contenido de cloruros (en aparatos de otras regiones no se observó este problema).

Análisis de las muestras provenientes del área Metropolitana de la ciudad de México.

Esta región representa una de las zonas de menor calidad del aire no solamente en México sino en el mundo (figura 4.13), aún cuando en la propia República Mexicana existen otras regiones en donde la concentración de algunos contaminantes, como el SO_2 , es mayor. Dicha situación es generada por las actividades industriales características de la región (figura 4.14).

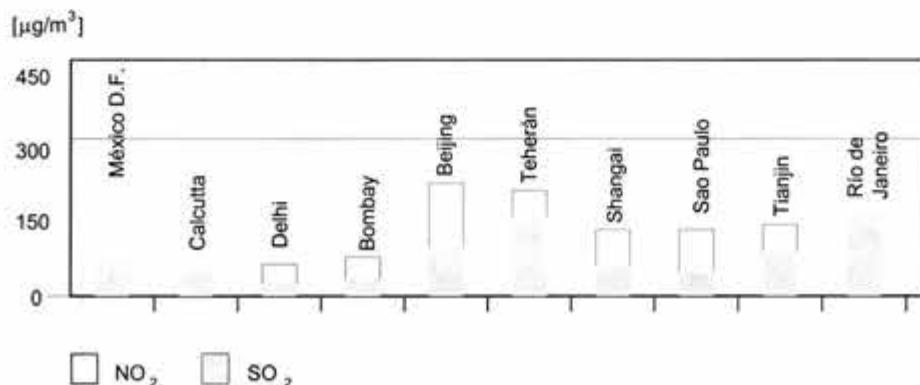


Figura 4.13. Concentraciones anuales acumuladas de SO_2 , NO_2 en ciudades con más de 9 millones de habitantes en 1995 (Fuente: Health, Environment and development Program. Urban Air Pollution Risks to Children: A Global Environmental Health Indicator. World Resources Institute, USA, 1999)

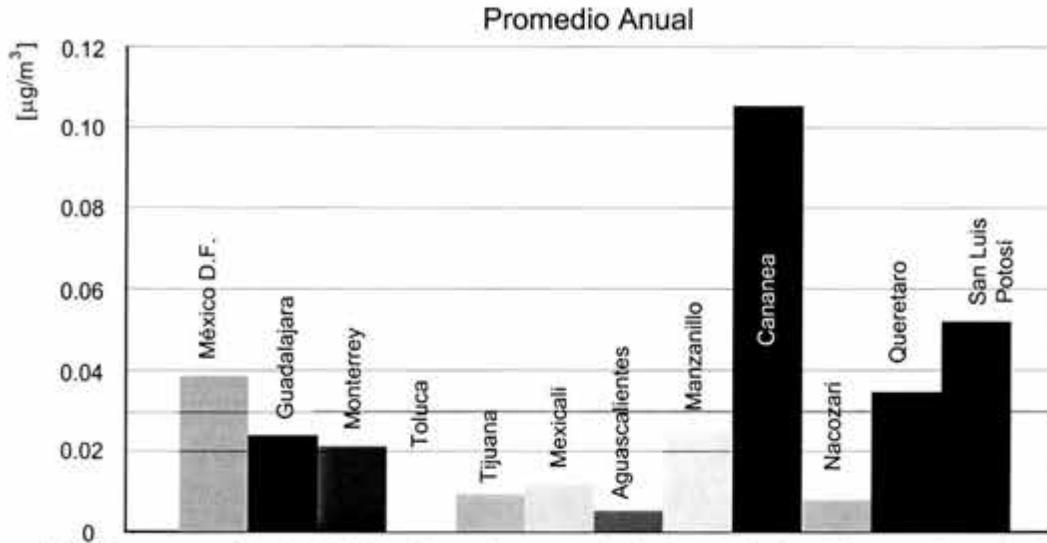


Figura 4.14. Concentración de bióxido de azufre en principales ciudades (Fuente: Segundo informe de la calidad del aire en Ciudades de la República Mexicana). En Cananea Sonora se registró un promedio de 3 veces la norma. Ciudad de México, Querétaro, y San Luis Potosí, se encuentran fuera de los niveles establecidos por la norma.

Los resultados correspondientes al deterioro característico observado en la ciudad de México, en principio, son sorprendentes, ya que fue relativamente difícil encontrar evidencia de corrosión en muchas partes de los circuitos (figuras 4.15 a 4.18). La contaminación en la Ciudad de México es sin duda muy severa, sin embargo, los principales problemas son el ozono, los NO_x, los VOCs y partículas suspendidas. Se sabe que todas estas sustancias aceleran la corrosión en presencia de otros contaminantes. El SO₂ está presente, mientras que se puede suponer que el cloro juega un papel de menor importancia. La diferencia principal, desde el punto de vista del ataque observado en las tarjetas electrónicas, entre Tampico y la Ciudad de México es la humedad. En Tampico, la condensación nocturna es lo suficientemente fuerte para provocar la falla en sistemas electrónicos en una etapa incipiente de corrosión. Este fenómeno es inexistente en la Ciudad de México. La remoción de NO_x y ozono en forma de HNO₃ y H₂O₂ necesita la presencia de una fase acuosa, por lo que su influencia en la región de Tampico será más fuerte. La acumulación de SO₂ sigue la misma lógica, con excepción de la plata, la cual se corroe en atmósferas secas.

Por consecuencia se puede concluir que la baja humedad relativa característica de la zona metropolitana de la ciudad de México se traduce en mucho menores índices de deterioro en el equipo electrónico, si bien para esto habrá que considerar la existencia de microclimas en la propia zona metropolitana.

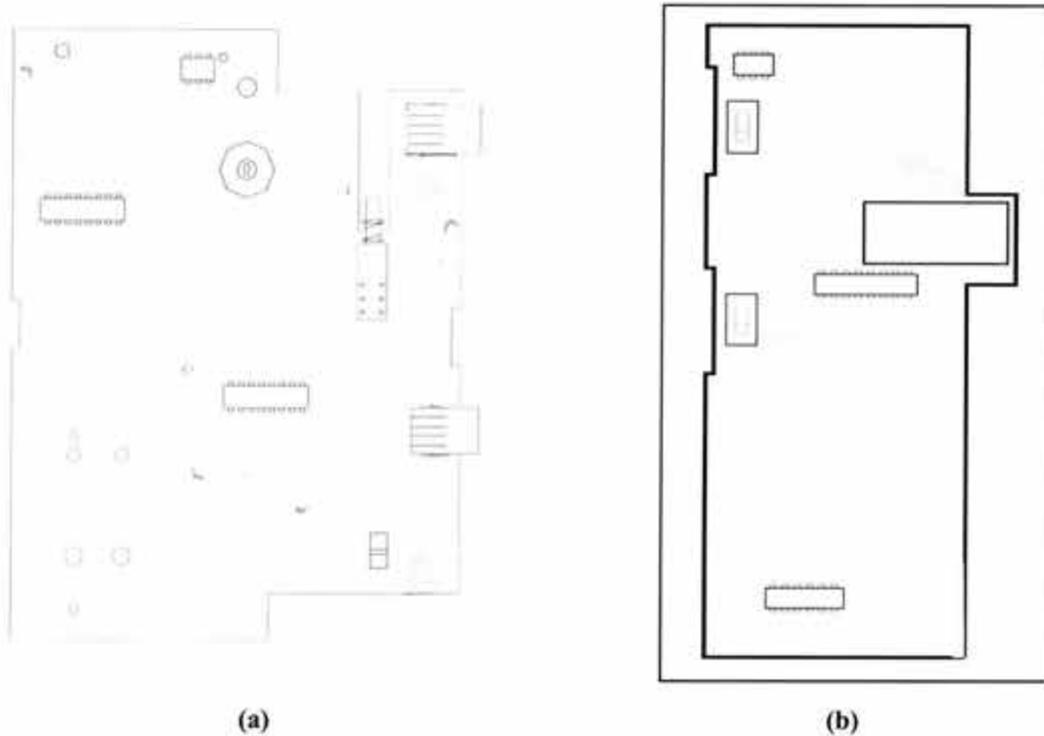


Figura 4.15. En la de la izquierda (a) se muestra la distribución de los depósitos, estrictamente no se evidenció daño. El aparato corresponde a la zona poniente del área metropolitana de la ciudad de México. El diagrama de la derecha (b) corresponde a un aparato instalado en la zona oriente.

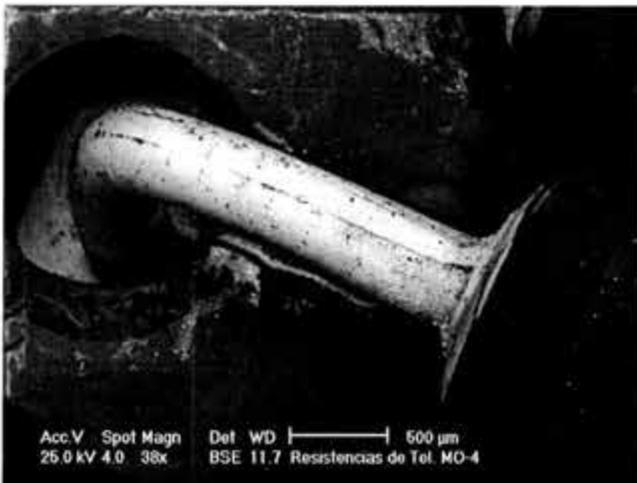


Figura 4.16 En el conductor de esta resistencia se aprecia que el recubrimiento de estaño se encuentra prácticamente sin deterioro y que los depósitos son básicamente óxidos (esto de acuerdo a los resultados del análisis químico de la tabla 4.4).

Tabla 4.4. Análisis cuantitativo de la superficie estañada de la figura 4.16. La presencia de hierro se puede correlacionar con el material de la resistencia

Elemento	Wt %	At %
O K	25.00	66.50
SnL	59.00	21.25
FeK	16.00	12.25
Total	100	100

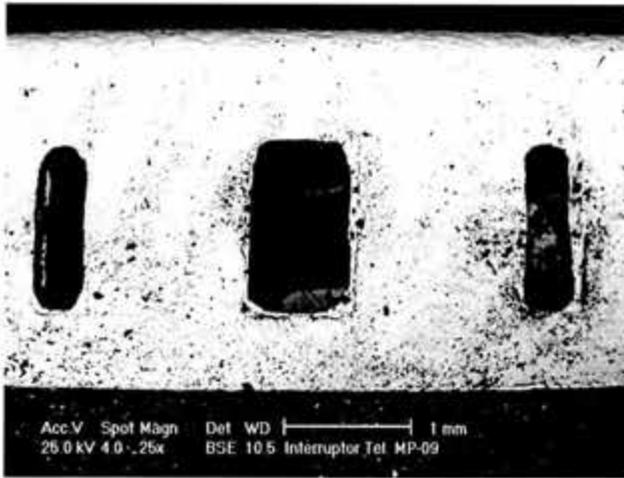


Figura 4.17a Interruptor. Se trata de una lámina de acero de bajo carbono troquelada y niquelada. La formación de depósitos también en este caso es mínima

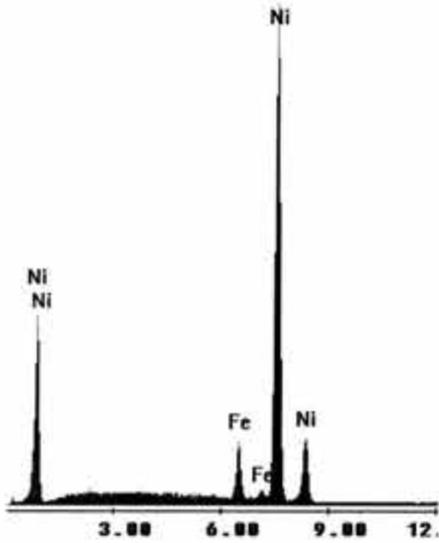


Figura 4.17b Espectro del recubrimiento de la pieza de la figura 4.17a

Tabla 4.5a. El análisis del espectro del interruptor confirma que se trata de lámina de acero niquelada

Elemento	Wt %	At %
FeK	5.69	5.97
NiK	94.31	94.03
Total	100	100

Figura 4.17c Espectro de los depósitos formados en la pieza de la figura 4.17a

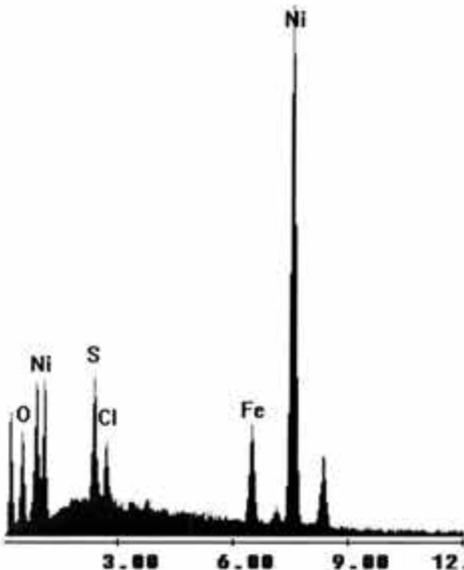


Tabla 4.5b. Análisis cuantitativo de los depósitos formados en la superficie niquelada del interruptor. Se aprecia un efecto tanto del azufre como del Cl

Elemento	Wt %	At %
O K	12.2	31.91
S K	6.25	8.16
ClK	3.23	3.82
FeK	7.42	5.56
NiK	70.9	50.55
Total	100	100

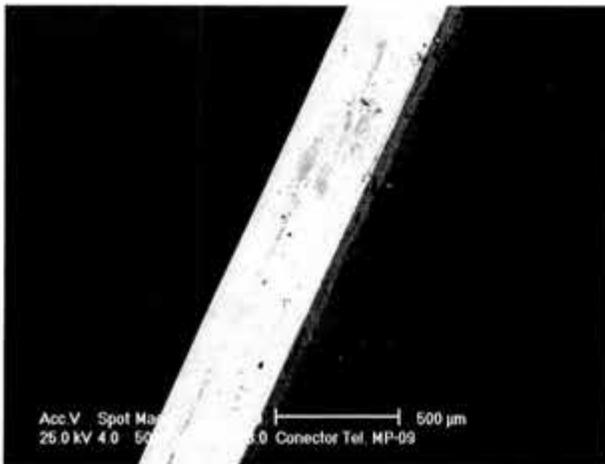


Figura 4.18a. Conector de cobre recubierto de oro. La formación de depósitos es despreciable.

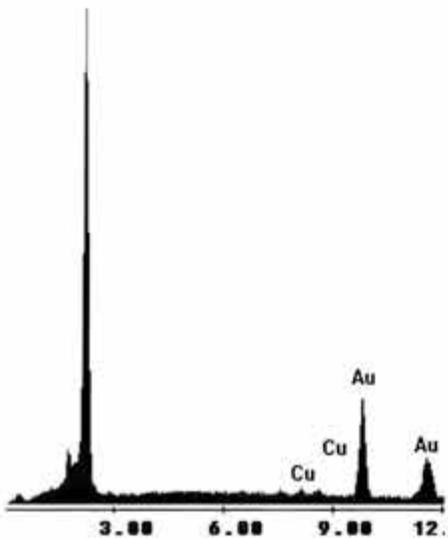


Figura 4.18 b. Espectro correspondiente al conector de la figura anterior

Tabla 4.6a. El análisis químico confirma que se trata de un recubrimiento de oro en un conductor de cobre

Elemento	Wt %	At %
CuK	1.1	3.34
AuL	98.9	96.66
Total	100	100

Figura 4.18c. Espectro correspondiente a los depósitos formados en el conector

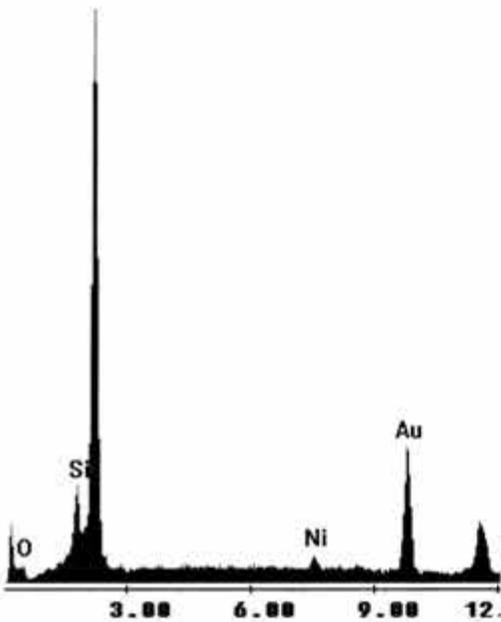


Tabla 4.6b. Análisis de los depósitos formados en el recubrimiento de oro

Elemento	Wt %	At %
O K	3.05	22.94
SiK	4.19	17.94
NiK	1.76	3.61
AuL	90.99	55.51
Total	100	100

Análisis de las muestras provenientes de la Región Oaxtepec-Cocoyoc

La corrosividad característica de esta región se presume, en principio, deberá ser menor que la correspondiente para Tampico y la ciudad de México, esto en virtud de ser una zona con reducida contaminación atmosférica, altas temperaturas y precipitaciones medias.

Sin embargo, las observaciones realizadas demuestran una importante precipitación de compuestos de azufre, lo cual es contradictorio a las condiciones esperadas de contaminación, dado que se trata de una atmósfera rural. Por otra parte resulta también sorprendente la presencia de altos niveles de cloruros. Los análisis realizados demuestran que el cloro está combinado con potasio, además de que las partículas de hollín eran abundantes en todas las muestras inspeccionadas. Estos contaminantes se pueden correlacionar con prácticas agrícolas de las regiones adyacentes, en las que muchas de las tierras de cultivo disponibles se orientan a la siembra de caña de azúcar, campos agrícolas que antes de la zafra son quemados (se eliminan hojas y alimañas) para facilitar la cosecha. Esto da lugar a la presencia de compuestos de cloro y a la alta incidencia de partículas de carbón. Por su parte, la elevada concentración de compuestos de azufre se puede relacionar con las frecuentes exhalaciones del Popocatepetl. Otro contaminante presente en niveles mayores que en las otras zonas fueron las partículas, asimismo se determinó la presencia de Al, Si y Ca en los productos de corrosión. Todo lo cual confirma el efecto de la existencia de cenizas volcánicas.

La corrosión en Cocoyoc se concentra generalmente alrededor de partículas o sales cristalizadas, esto es una indicación de una condensación limitada e intermitente en las superficies, mientras que los contaminantes se acumulan durante la fase húmeda y se cristalizan al secarse. La presencia de sales higroscópicas o partículas de polvo que sirven como inoculantes causan la condensación en el mismo lugar durante cada ciclo de condensación-secado.

Lo anterior conduce a cuestionar la aseveración de que las zonas rurales no están contaminadas, lo cual no puede aceptarse sin un análisis crítico, ya que las condiciones encontradas en las zonas rurales de México son totalmente distintas a las de Suecia o lo que se puede encontrar en las Islas Canarias o Nueva Zelanda [41,44].

Asimismo en estas muestras se observaron evidencias de corrosión a través del recubrimiento de oro (no homogéneo), en alambres de cobre con revestimiento intermedio de níquel (figura 4.19). Los productos de corrosión se caracterizan por la presencia de depósitos de cloruros de níquel y cobre, combinados con compuestos de azufre en menor proporción. En la figura 4.20 se observa el deterioro de un conector de latón, el cual se encontraba en contacto con un alambre revestido con oro. En este caso se presenta la formación de compuestos del sustrato los cuales fluyen a través de los poros del recubrimiento de oro (Figura 3.8). Es evidente que también existe la formación de una celda galvánica al entrar en contacto el conector de latón con el alambre dorado, situación que favorece la corrosión del latón dando como resultado la presencia de productos de corrosión de cobre y zinc, en los que se manifestó también la existencia de cloro, y cantidades menores de azufre combinado con oxígeno. Esto confirma la teoría de que el uso del oro promueve la corrosión en equipo de electrónico en lugar de prevenirlo (en virtud de los contaminantes presentes).

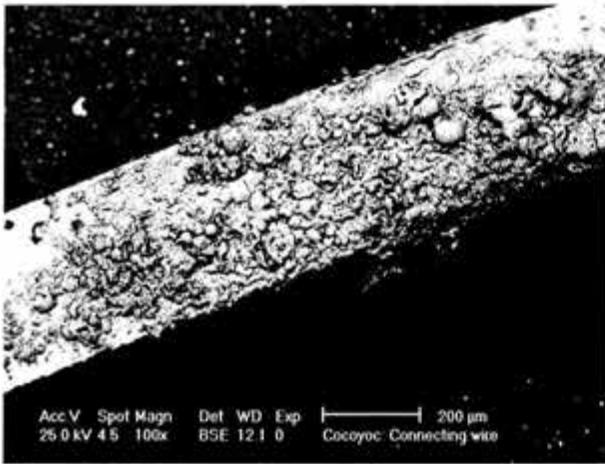


Figura 4.19 Productos de corrosión en un alambre de cobre recubierto con níquel y con un depósito exterior de oro



Figura 4.20 Conector de latón en contacto con un alambre recubierto con oro. En general la superficie se ve deteriorada por efecto de la corrosión (zonas oscuras). Los productos de corrosión se caracterizan por la presencia de cloro y en menores proporciones de azufre.

La influencia relativa del cloro y el azufre como agentes corrosivos se muestra en la figura 4.21 para el caso de Cocoyoc. Se ha observado que la plata y el níquel están afectados principalmente por el azufre, aunque se detecta fuerte presencia de cloro en algunos productos de corrosión base plata. El latón está más afectado por el cloro. Si estos datos se comparan con los resultados de Tampico, se observa que el azufre predomina de tal manera que elaborar una gráfica como la 4.21 tendría poco sentido.

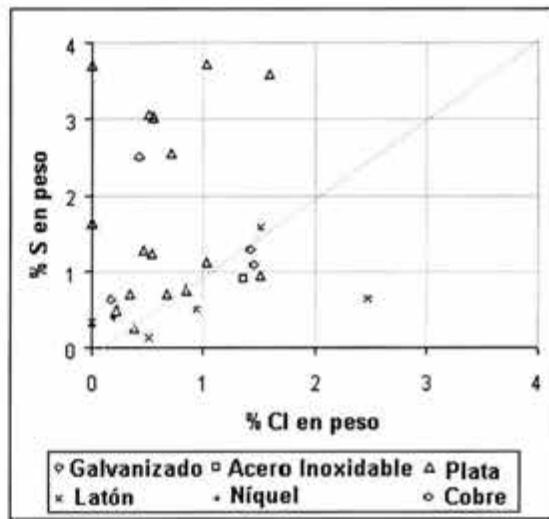
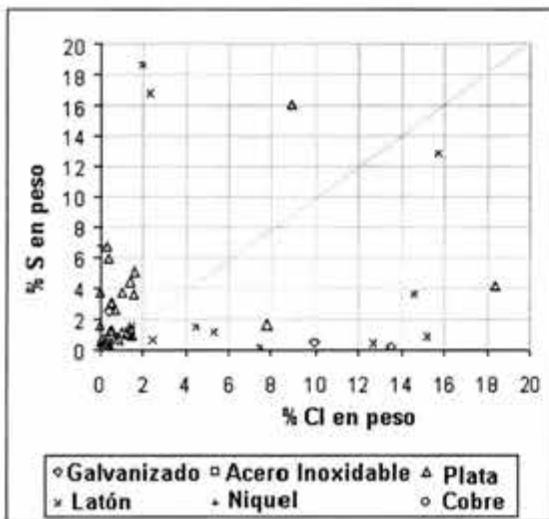


Figura 4.21. Se puede observar el tipo de compuestos formados en cada uno de los materiales analizados (-acero galvanizado; x-latón, |]-acero inoxidable, +recubrimientos de níquel, ^ recubrimientos de plata, o-cobre). Para cada material se describen los principales depósitos, por ejemplo en los revestimientos de plata se encontraron sobre todo compuestos de azufre. En general se describe la relación entre los diversos compuestos, todo esto para las piezas provenientes de Cocoyoc. Asimismo existe oxígeno y compuesto de nitrógeno en los depósitos analizados.

Análisis de las muestras provenientes de Coatzacoalcos, Veracruz

Se puede considerar que una de las regiones más críticas en México, desde el punto de vista de corrosión atmosférica, es la zona de Coatzacoalcos, ya que en ésta se conjugan la mayoría de las variables que mayor énfasis tienen en dicho fenómeno (elevada humedad y temperaturas, contaminantes producto de las emisiones de la industria pesada y de fuentes móviles, cloruros, etc). Sin embargo, las observaciones realizadas indican en general grados de deterioro inferiores a los reportados para los especímenes provenientes de Tampico. Lo anterior se debe a que las muestras provenientes de Tampico estaban instaladas en casas habitación sin aire acondicionado, por su parte las condiciones climáticas más extremas de Coatzacoalcos dan como consecuencia que los equipos se encontraran en ambientes con acondicionamiento de aire, situación que reduce los problemas, de acuerdo a lo observado en las tarjetas (figuras 4.22 a 4.26). Asimismo, es conveniente mencionar que los equipos retirados de ésta localidad estuvieron en operación durante mucho mayor tiempo (2 a 4 años) que los de Tampico (3 a 12 meses). Esta situación confirma la importancia que un ambiente con menor intercambio de aire con el exterior, humedad controlada y sin importantes variaciones de temperatura (mínima condensación) tiene en el deterioro del equipo y dispositivos electrónicos. En los equipos retirados de Coatzacoalcos existe mínima evidencia de formación de condensado, a diferencia de los de Tampico. En cuanto a los depósitos se encontró también la presencia de cloruros y sulfuros de acuerdo a los materiales analizados, lo que permite suponer similares procesos a lo descrito para Tampico, con el énfasis de un menor deterioro.

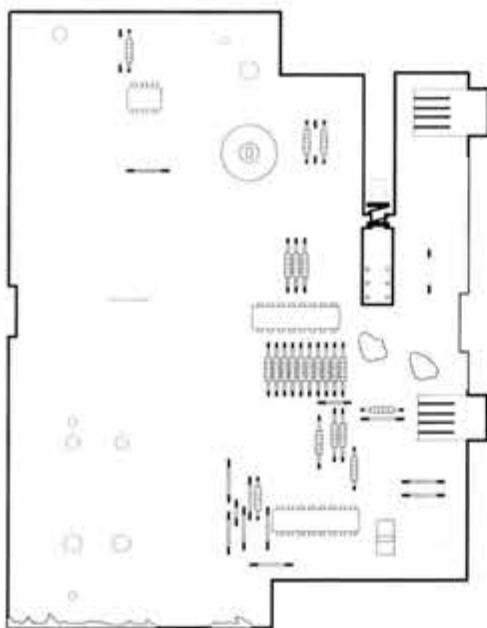


Figura 4.22a. En la tarjeta se observan depósitos apreciables a simple vista (terminales de resistencias y conectores), así existe evidencia de condensación en algunas zonas de la tarjeta.

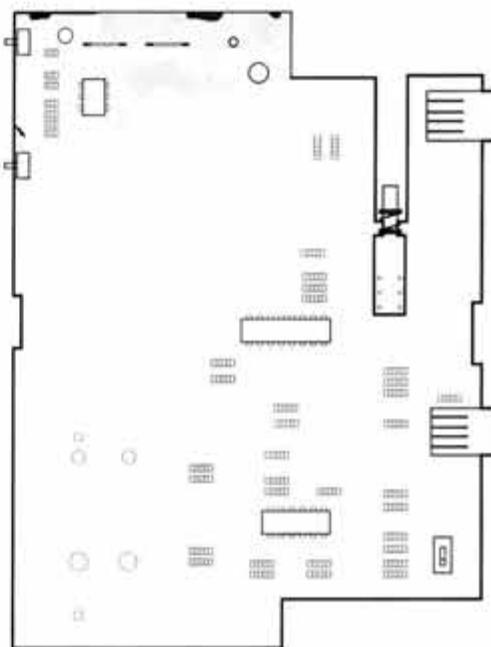


Figura 4.22b. La condensación y el deterioro son más evidentes, en particular en la zona superior de la tarjeta.

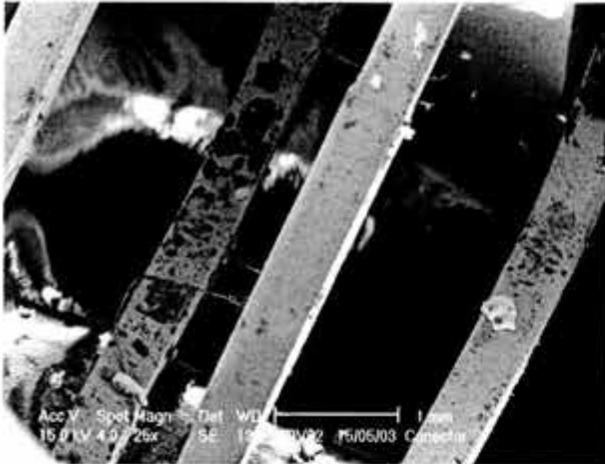


Figura 4.23a. Pines de conexión de cobre recubiertos de oro. Se manifiesta la formación de depósitos de oro. Se manifiesta la formación de depósitos

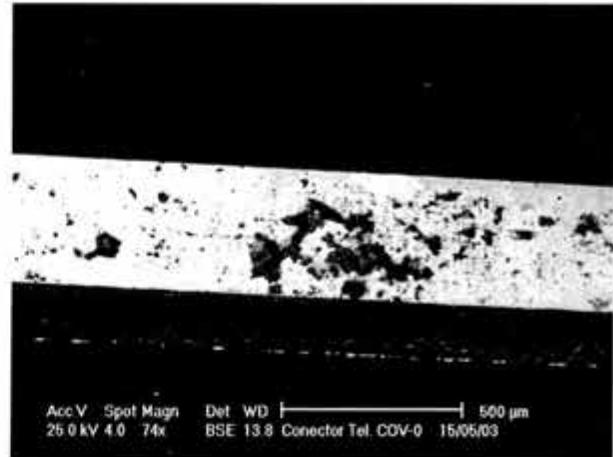


Figura 4.23b. Detalle de la imagen anterior, el ataque tiende a extenderse dada la porosidad del recubrimiento

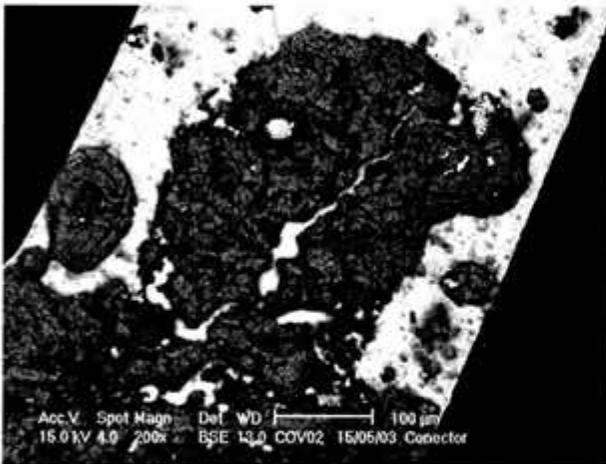


Figura 4.23c. A través de las heterogeneidades del recubrimiento de oro se lleva a efecto el ataque de la capa intermedia de níquel y del propio cobre del conductor. De la tabla 4.7 es evidente el efecto sinérgico de azufre y cloro

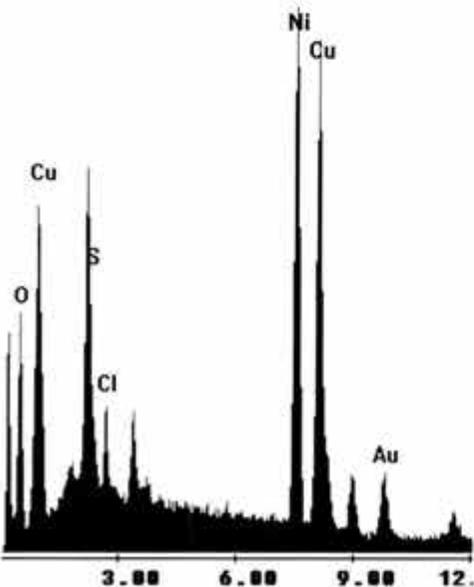


Figura 4.23d Espectro del depósito formado en el conector

Tabla 4.7. Análisis cuantitativo del depósito de la imagen 4.23c

Elemento	Wt %	At %
O K	13.11	39.32
S K	4	5.99
Cl K	2.03	2.75
Ni K	27.47	22.45
Cu K	32.23	24.34
Au L	21.16	5.15
Total	100	100



Figura 4.24a. Imagen a bajos aumentos (20x) de la carcasa del interruptor. Se trata de acero de bajo carbono niquelado, lo cual se confirma a través del análisis presentado en la tabla 4.8a

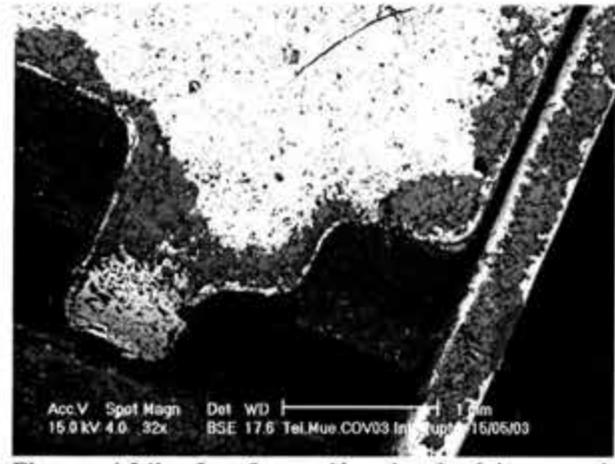


Figura 4.24b. La formación de depósitos en la superficie niquelada es importante, sobre todo en los bordes adyacentes al troquelado

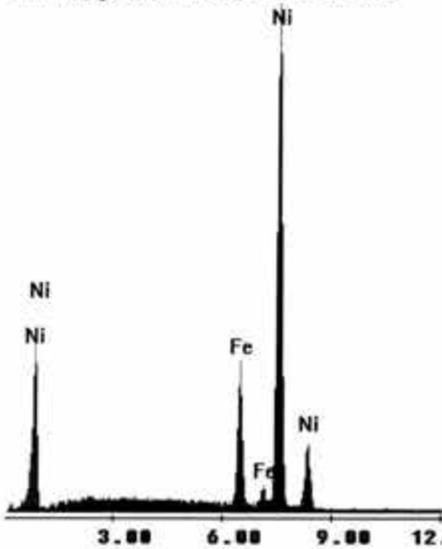


Figura 4.24c. Espectro de la superficie niquelada

Tabla 4.8a. El análisis del espectro 4.24c indica que para el caso de la carcasa del conector se trata de chapa de acero niquelada.

Elemento	Wt %	At %
FeK	13.12	13.7
NiK	86.88	86.3
Total	100	100

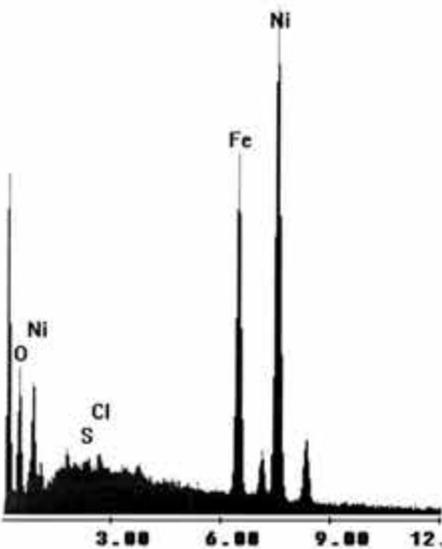


Figura 4.24d. Espectro de los depósitos formados en la superficie niquelada (figura 4.24b)

Tabla 4.8b. El análisis del espectro 4.24d indica que los depósitos formados corresponden fundamentalmente a óxidos de hierro

Elemento	Wt %	At %
O K	12.36	33.53
S K	0.64	0.86
ClK	0.68	0.83
FeK	24.53	19.07
NiK	61.8	45.7
Total	100	100

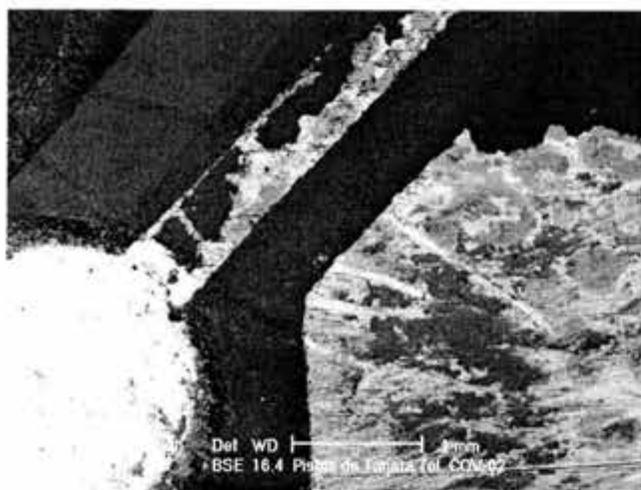


Figura 4.25a. Detalle de una sección de la pista de la tarjeta impresa en una zona de soldadura (inferior izquierda)

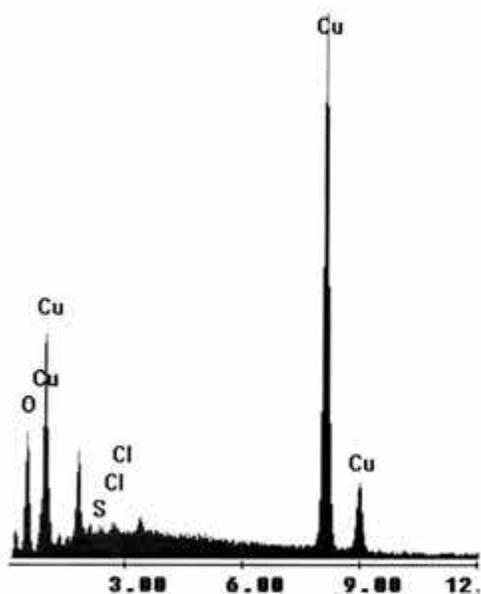


Figura 4.25b. Espectro de la pista

Tabla 4.9a. La pista de la tarjeta es de cobre. El deterioro de su recubrimiento favorece la oxidación.

Elemento	Wt %	At %
O K	13.59	38.2
S K	0.43	0.61
ClK	0.59	0.75
CuK	85.39	60.45
Total	100	100

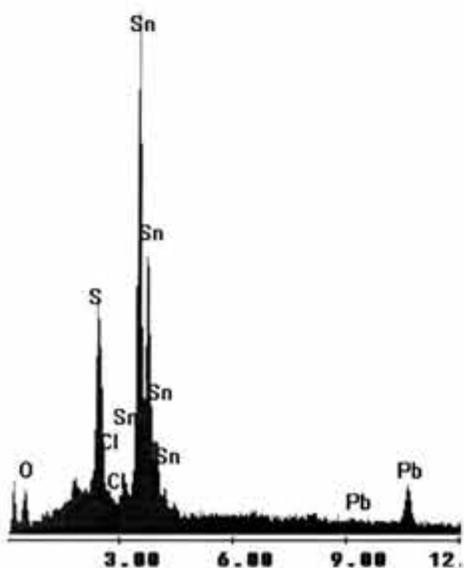


Figura 4.25c. Espectro de la zona de soldadura.

Tabla 4.9b. En la soldadura (PbSn) también existe un efecto por la presencia de cloro y azufre.

Elemento	Wt %	At %
O K	8.62	40.58
S K	4.5	10.58
ClK	1.33	2.83
SnL	54.94	34.88
PbL	30.61	11.13
Total	100	100

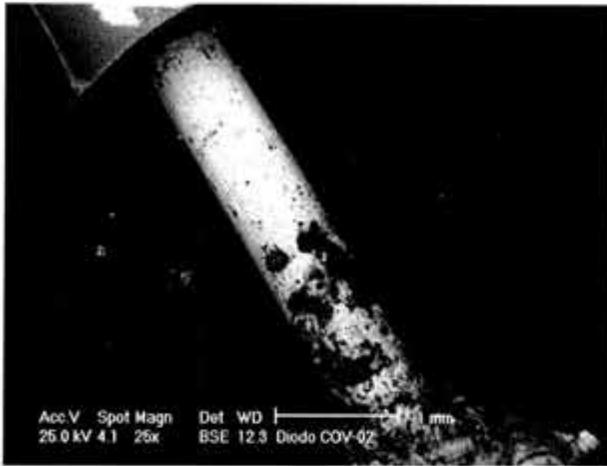


Figura 4.26a. Conector de diodo (25x). Se trata de un alambre de cobre estañado

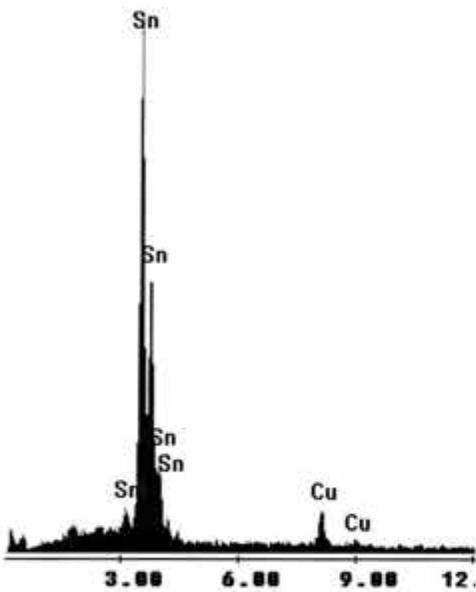


Figura 4.26b. Espectro de la superficie estañada

Tabla 4.10a. El análisis del espectro confirma que se trata de un conector de cobre estañado (figura 4.26a)

Elemento	Wt %	At %
SnL	90.21	83.15
CuK	9.79	16.85
Total	100	100

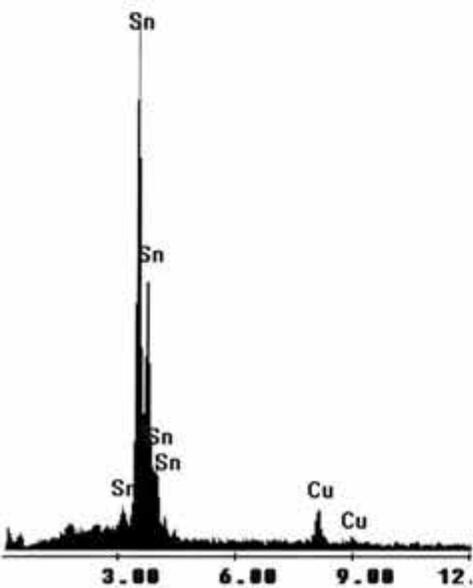


Figura 4.26c Espectro de los depósitos observados en la figura 4.26a.

Tabla 4.10b. De los resultados del análisis de los depósitos observados en la figura 4.26a, se concluye en el ataque sobre el conductor a través de las heterogeneidades del recubrimiento.

Elemento	Wt %	At %
O K	13.61	37.16
MgK	3.39	6.1
SiK	4.79	7.45
S K	2.07	2.82
SnL	18.32	6.74
CuK	57.81	39.74
Total	100	100

Análisis de muestras provenientes de Bahía de Banderas (Puerto Vallarta)

En este caso se tomaron muestras no solo del área del puerto sino de las regiones cercanas a Bahía de Banderas, las que se caracterizan por una intensa actividad agrícola, se encuentran prácticamente a nivel del mar y no más de 10 km de la costa. Los aparatos evaluados correspondientes a la zona del puerto estuvieron en servicio en áreas con aire acondicionado, mientras que los de los de regiones agrícolas operaron en sitios con amplio intercambio de aire con el exterior. En general el deterioro es menor al correspondiente al de las muestras provenientes de Tampico. La elaboración de mapas de deterioro de las tarjetas (figura 4.27) fue compleja, ya que a simple vista resultó difícil determinar la presencia de zonas de condensado. Para su análisis a detalle se tomaron muestras de pines de conexión, resistencias e interruptores (figuras 4.28 a 4.32). El deterioro observado en conectores o en pines recubiertos con oro (figuras 4.28 y 4.29) es mayor aún que a lo observado para las muestras de Coatzacoalcos. En particular, el deterioro más severo se encuentra en los recubrimientos de estaño (figuras 4.30 y 4.31). En todos los casos analizados, con excepción de un conector de oro, y a diferencia de las muestras provenientes de Tampico y de Coatzacoalcos, no se encontró evidencia de la participación de azufre en el ataque, identificando fundamentalmente la participación de cloruros en el ataque. Se puede concluir, en general, que el deterioro se correlaciona con la alta humedad relativa característica combinada con la alta concentración de cloruros en la atmósfera. Por otra parte la región se caracteriza por una menor agresividad atmosférica (en cuanto a equipo electrónico) que la región del golfo.

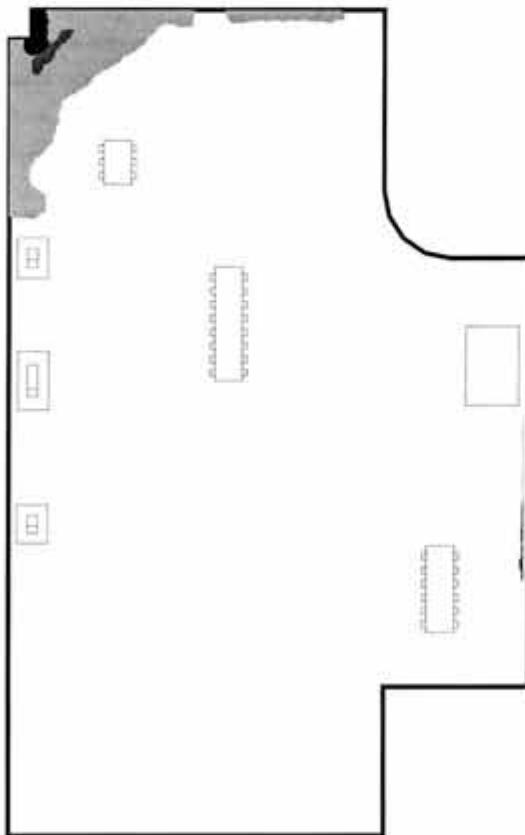


Figura 4.27. Mapa del deterioro de una tarjeta impresa correspondiente a un aparato instalado en Puerto Vallarta.

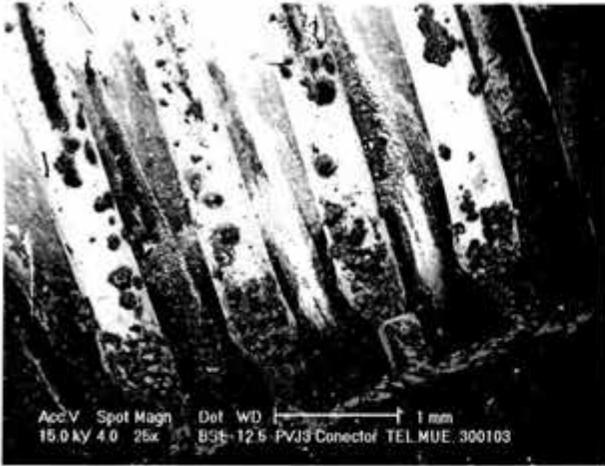


Figura 4.28a. Pines de conexión recubiertos de oro



Figura 4.28b. El deterioro es muy intenso sobre todo en la zona de ensamble (parte inferior de la figura 4.28a)

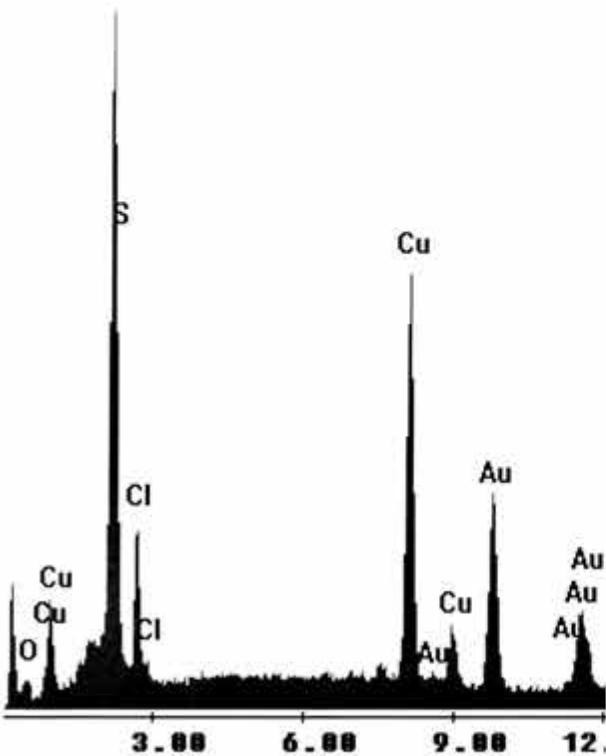


Figura 4.28c. Espectro de los depósitos formados en el conector de cobre recubierto de oro

Tabla 4.11. El análisis cuantitativo del espectro de la figura 4.28c, indica que se trata de un recubrimiento de oro de baja calidad, cuya interfase con el cobre es a través de un recubrimiento de níquel.

Elemento	Wt %	At %
O K	6.61	23.28
NiK	58.08	55.71
CuK	18.17	16.1
AuL	17.14	4.9
Total	100	100

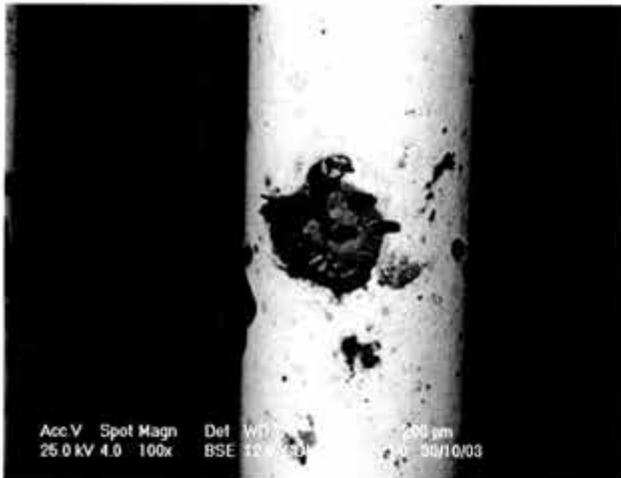


Figura 4.29a. En un aparato telefónico existen diversos pines recubiertos de oro. La calidad del revestimiento no necesariamente es la misma, lo que se confirma a través del grado de deterioro

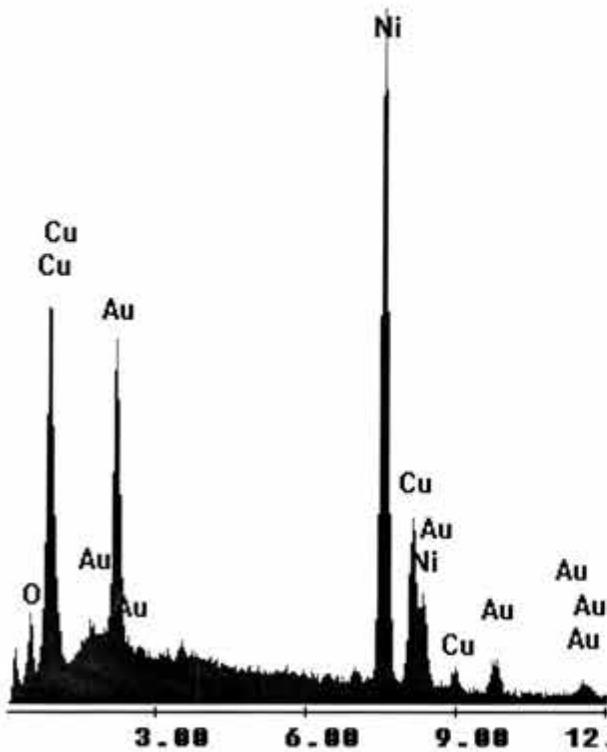


Figura 4.29b. Espectro correspondiente a la imagen 4.29a. Los resultados (tabla 4.12) permiten concluir un efecto combinado de compuestos de azufre y Cl.

Tabla 4.12. Análisis cuantitativo de los depósitos observados en la figura 4.29a.

Elemento	Wt %	At %
O K	2.48	12.69
S K	7.36	18.78
Cl K	4.21	9.71
CuK	26.53	34.15
AuL	59.42	24.67
Total	100	100

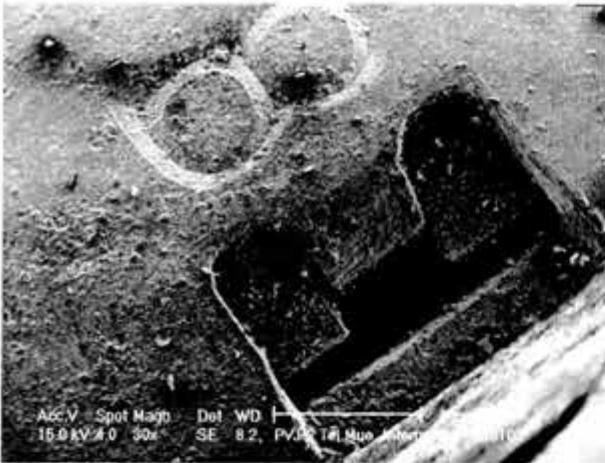


Figura 4.30a. Carcaza de conector. Se trata de chapa de acero estañada

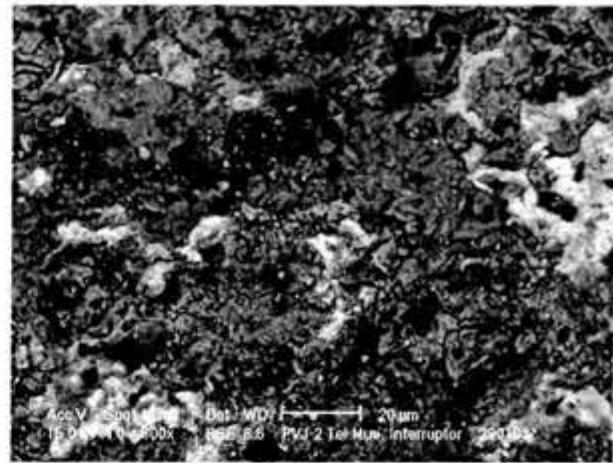


Figura 4.30b. Detalle de la figura anterior (800x). Las condiciones del medio provocan un deterioro importante de la superficie estañada

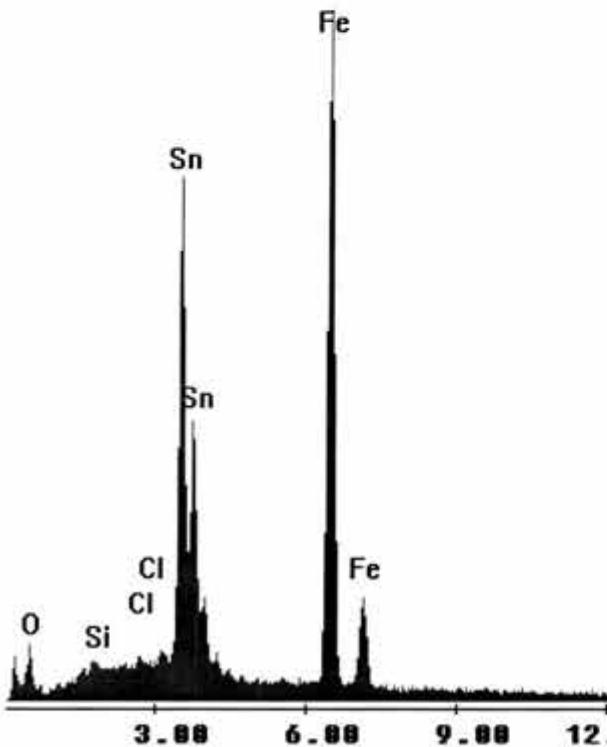


Figura 4.30c. Espectro correspondiente al análisis de la composición de los depósitos formados en la superficie estañada

Tabla 4.13. Del análisis cuantitativo del espectro de la figura 4.30c. Resulta evidente el ataque que el material base de la carcaza (chapa de acero) sufre bajo las condiciones de exposición.

Elemento	Wt %	At %
O K	6.66	24.58
SnL	41.49	20.63
FeK	51.85	54.79
Total	100	100



Figura 4.31a Conector de una resistencia. Se trata de un conductor de cobre recubierto con estaño. Los contaminantes presentes (cloruros) en combinación con una elevada humedad relativa dan como consecuencia un rápido deterioro del recubrimiento y su desprendimiento del conductor.

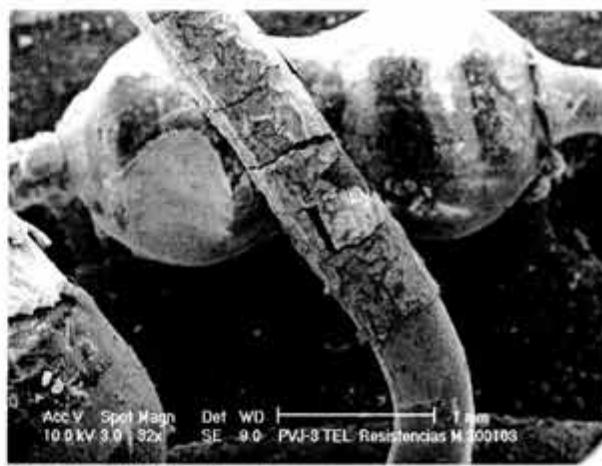


Figura 4.31b. Se observa claramente como el estañado se desprende del material base

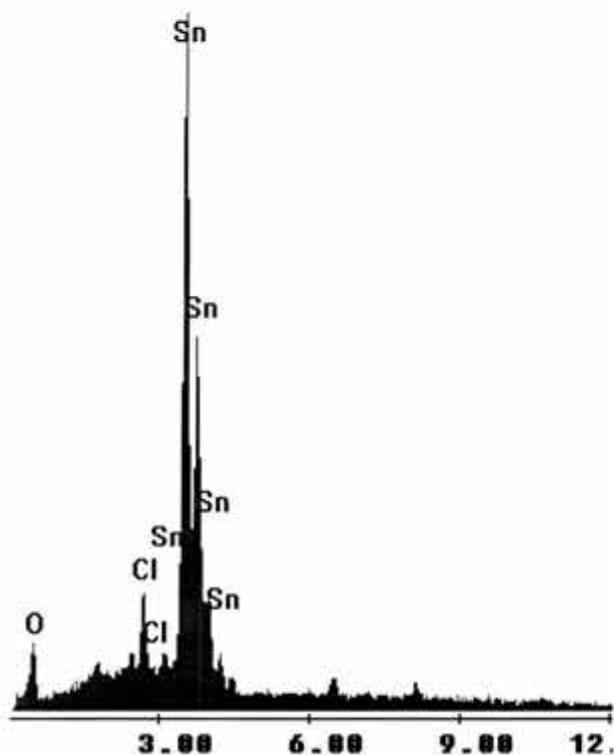


Figura 4.31c. Espectro correspondiente al recubrimiento del conector de la resistencia

Tabla 4.14. En el ataque del recubrimiento de estaño (figuras 4.31a y 4.31b), los cloruros tienen un efecto importante.

Elemento	Wt %	At %
O K	14.35	53.14
Cl K	3.48	5.83
Sn L	82.17	41.03
Total	100	100

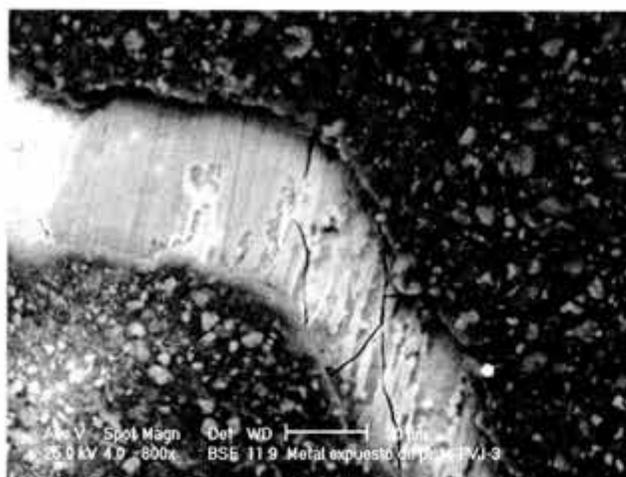


Figura 4.32a. Pista de cobre de un circuito integrado. Resulta evidente que éste perdió su recubrimiento protector, situación que se ha traducido en un notorio deterioro del camino conductor.

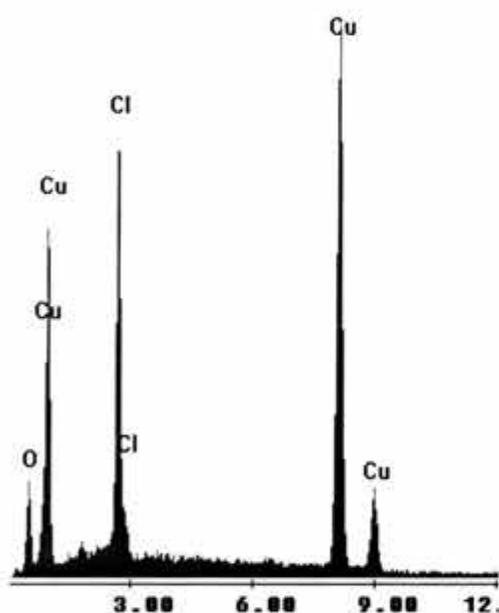


Figura 4.32b. Espectro correspondiente al camino conductor de la figura 4.32a

Tabla 4.15. En el ataque de las pistas de cobre (figura 4.32a) es notable el efecto de los cloruros presentes en el ambiente (marino)

Elemento	Wt %	At %
O K	9.98	27.84
ClK	16.08	20.24
CuK	73.93	51.92
Total	100	100

Análisis de muestras provenientes de Cuernavaca, Morelos

La región correspondiente a Cuernavaca, Morelos representa una zona de menor agresividad atmosférica, ya que los principales contaminantes provienen de fuentes móviles así como aquellos característicos de las actividades agrícolas que se desarrollan en las regiones cercanas a la zona urbana. Adicionalmente se debe considerar el efecto de los productos característicos de las actividades antropogénicas, ya que en este caso dichos contaminantes pueden tomar un lugar preponderante en el deterioro. Esta hipótesis se confirma con el análisis de los contaminantes encontrados en algunas tarjetas (figura 4.21).



Figura 4.33. En las tarjetas correspondientes a aparatos que estuvieron en servicio en Cuernavaca, el deterioro fue mínimo. Sin embargo, en algunas de éstas se presentó una gran cantidad de depósitos cuya apariencia permite considerar que su origen es antropogénico, lo que indica en este caso que las fuentes de contaminación corresponden a dicho origen. La imagen es de un aparato retirado de servicio después de 5 años de operación.



Figura 4.34a. Conector de cobre recubierto de oro. El deterioro del recubrimiento es muy fuerte, de tal forma que existe un notable desprendimiento del mismo

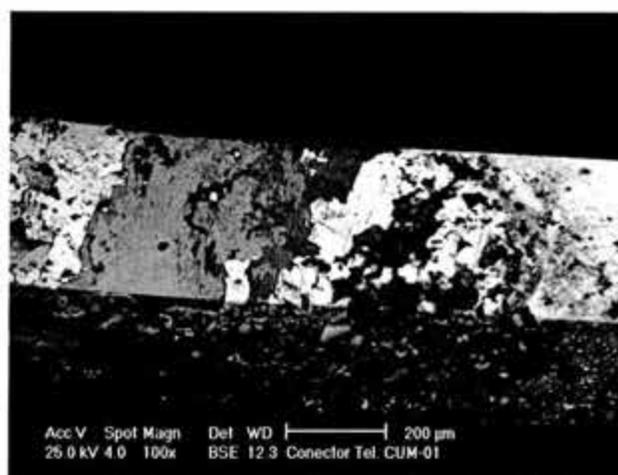


Figura 4.34b. A la vez de desprenderse la película de oro se forman depósitos complejos en los cuales se evidencia, de acuerdo al espectro de la figura 4.34c, la presencia de cloro y azufre

Figura 4.34c. Espectro correspondiente a los depósitos presentados en la figura 4.34b

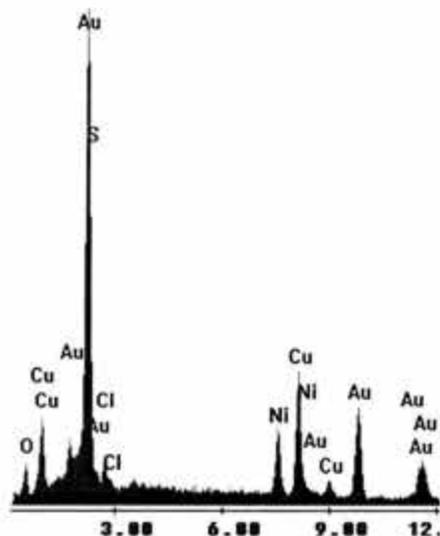


Tabla 4.16. Del análisis cuantitativo de los depósitos presentados en la figura 4.34b se desprende el efecto que los compuestos de cloro y azufre tienen en el deterioro del revestimiento.

Elemento	Wt %	At %
O K	6.84	31.05
S K	6.5	14.73
Cl K	1.88	3.86
Ni K	7.53	9.31
Cu K	16.24	18.56
Au L	61	22.49
Total	100	100

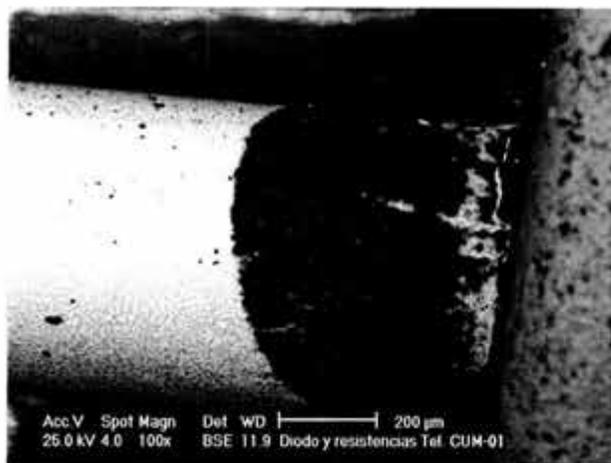


Figura 4.35a. Aspecto del conector de un diodo. Se trata de un conductor de cobre recubierto con una aleación 52Sn48Pb. En la zona adyacente al dispositivo se observa la formación de depósitos (espectro de la figura 4.35b y tabla 4.17)

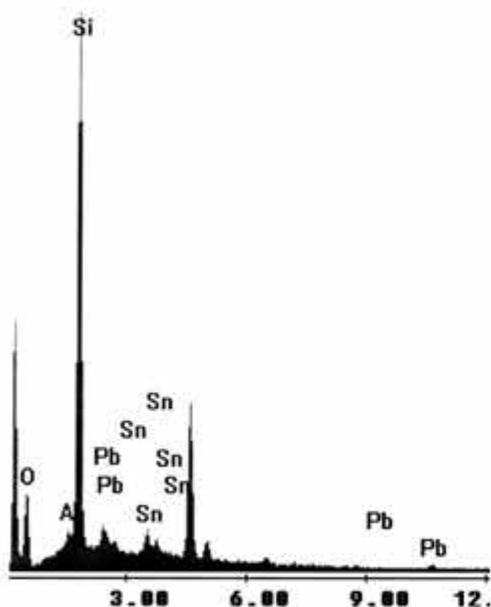


Figura 4.35 b. El espectro corresponde a la zona oscura de la figura 4.35a. Del análisis cuantitativo (tabla 4.17) resulta evidente la migración del silicio del diodo.

Tabla 4.17. Resultado del análisis cuantitativo de los depósitos observados en la figura 4.35a.

Elemento	Wt %	At %
O K	31.71	49.14
AlK	1.61	1.47
SiK	53.73	47.43
SnL	4.48	0.94
PbL	8.48	1.01
Total	100	100

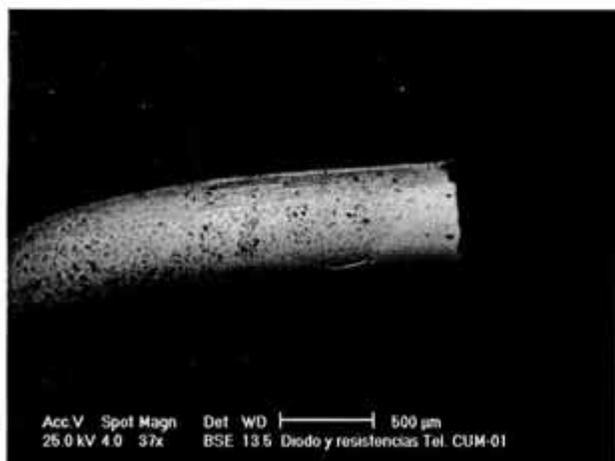


Figura 4.36. Conector de una resistencia. Se trata de un conductor de cobre estañado (tabla 4.18). No se observa prácticamente deterioro.

Tabla 4.18. Análisis cuantitativo correspondiente al recubrimiento de la figura 4.36

Elemento	Wt %	At %
O K	7.45	35.94
SnL	85.62	55.64
CuK	6.93	8.41
Total	100	100

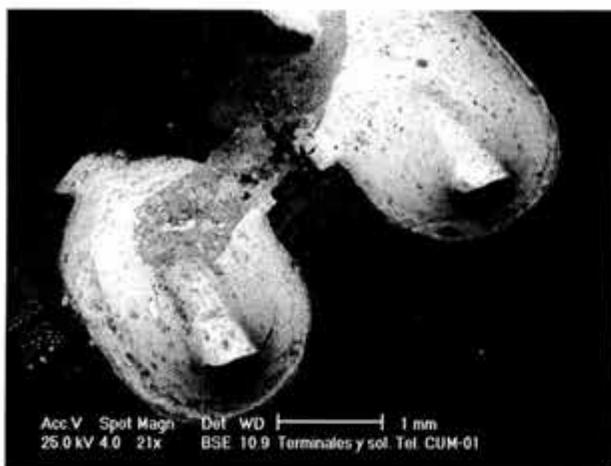


Figura 4.37. Región correspondiente a la unión de los conectores de las resistencias a las pistas de la tarjeta. Se trata de una soldadura SnPb, resulta evidente la presencia de residuos del fundente (Zona superior centro-izquierda)

Tabla 4.19. Composición de los depósitos observados en la figura 4.37. La presencia de cloro se puede correlacionar con una inadecuada práctica de limpieza de los fundentes empleados en la operación de soldadura.

Elemento	Wt %	At %
O K	12.6	48.63
SiK	4.61	10.14
ClK	10.46	18.23
SnL	6.53	3.4
PbL	65.8	19.61
Total	100	100

4.4 CONCLUSIONES

El método propuesto para el análisis del deterioro en equipo electrónico no se puede catalogar como convencional. Sin embargo, es indiscutible que ha permitido recabar información necesaria, en cuanto al efecto de contaminantes y los problemas que se suscitan en campo.

En particular, el método planteado en el estudio no brinda detalles con relación a la naturaleza exacta de los mecanismos involucrados en el deterioro, pero sí proporciona información valiosa con relación a la problemática, y permite generar conclusiones que favorecen la definición de acciones preventivas, a la vez de precisar condiciones críticas de exposición. Por otra parte, los análisis significan una primera aproximación en cuanto a los inconvenientes, que por corrosión se presenta en equipo electrónico, esto en las diferentes regiones climáticas características del país.

Si bien el análisis se orientó a solo seis regiones del país, se considera que éstas son representativas de las diferentes atmósferas (urbana, rural, marina, industrial), a la vez que algunas de éstas, como en el caso de Coatzacoalcos y la Ciudad de México, son consideradas como críticas en cuanto a sus niveles de contaminación. Es por consecuencia que la información recabada permite tomar acciones de protección y mejora para el equipo instalado en condiciones similares a las del análisis. No se realizaron estudios en zonas que se pudieran clasificar de muy baja corrosividad de acuerdo al tiempo de humectación (esto conforme a ISO 9223), ya que se parte de la consideración de que la humedad es variable fundamental en el deterioro.

Si bien, los estudios que se presentan demandan una mayor extensión y profundización en cuanto al efecto particular de los contaminantes presentes, los resultados representan un valioso auxiliar en la definición de las variables críticas en el deterioro, esto cuando menos en lo que a los dispositivos y equipo electrónico se refiere.

Una de las principales desventajas del método planteado lo representa la falta de datos con respecto a una estimación cualitativa de la velocidad de corrosión basada en la observación microscópica de la magnitud del daño.

No obstante, el método es rápido, pues no fue necesario esperar los resultados de las pruebas de exposición (de hecho las muestras empleadas representan en sí a los especímenes de exposición) para conocer la problemática característica de cada región así como su grado de corrosividad (en lo que se refiere a equipo electrónico). La estimación rápida es una condición clave para este estudio, ya que a la vez de permitir la detección de problemas relacionados con el diseño y la manufactura favorece también la definición de los agentes críticos para cada caso. Estos análisis son imposibles de realizar a partir de los resultados de exposición, o a través de pruebas de laboratorio en cupones metálicos, ya que la problemática bajo estudio resulta de la interacción de diversos factores (materiales, geometrías, condiciones de operación). Estas diferencias se traducen en la no coincidencia entre lo observado en campo y lo reportado de ensayos estándar. Es por consecuencia la importancia del presente enfoque, ya que permite relacionar de manera más directa los datos obtenidos con las necesidades de la industria electrónica.

Si bien, el enfoque experimental seguido en el presente estudio está fuera de los procedimientos establecidos, éste ha permitido la determinación de los principales factores involucrados en la corrosión de los equipos electrónicos bajo las condiciones climáticas analizadas. Es por consecuencia necesario mencionar que a la fecha no existen pruebas estándar que hayan podido llegar a los mismos resultados.

De los resultados se constata el efecto del empleo de sistemas de acondicionamiento de aire, esto en cuanto a la corrosividad característica del medio. Se determinó que la corrosión en interiores puede ser mucho más severa en regiones tropicales y subtropicales que la característica a las zonas con menor humedad. Resulta evidente, que si bien los altos niveles de contaminación pueden influir en la rapidez del deterioro, éstos no representan la variable fundamental para el caso bajo estudio, sino que la humedad relativa resulta ser la variable de mayor importancia en el deterioro del equipo electrónico, ya que además la presencia de condensado puede producir fallas intermitentes del sistema aún antes de que la corrosión origine daños.

Bajo estas condiciones, detalles de diseño que no son importantes en climas templados y secos se convierten en factores vitales cuando el equipo es expuesto a climas húmedos y subhúmedos. De lo observado se concluye la imperiosa necesidad de evitar al máximo la formación de celdas galvánicas, de mejorar la calidad de los revestimientos, sobre todo en el caso de los de oro. A través de los resultados del estudio se comprueba que los recubrimientos de oro (sobre todo si son heterogéneos) son fuente importante de corrosión galvánica. Por otra parte las zonas que provocan la acumulación de condensado y la formación de electrolitos también deben ser eliminados. El recubrimiento con estaño y el empaque mediante polímeros son efectivos, con algunas excepciones, para retardar la presencia de inconvenientes por corrosión.

Asimismo de este estudio se constata que las condiciones a las cuales se puede exponer el equipo son altamente variables dependiendo de las circunstancias locales, pudiendo en ocasiones aproximarse a lo reportado para regiones templadas con atmósferas controladas, características de los países altamente desarrollados. Sin embargo, bajo la óptica de que más de la mitad de la población mundial vive en regiones con climas tropicales y subtropicales, se justifica la conveniencia de éste estudio y las conclusiones que de él se desprenden.

Capítulo 5. Diseño de una cámara de atmósfera controlada para la simulación acelerada de la corrosión en equipo electrónico

5.1 CONVENIENCIA DEL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA AD HOC

El desarrollo de protocolos de ensayo para evaluar la problemática que por corrosión presenta el equipo electrónico, ha sido una constante por parte de diversas empresas y asociaciones del ramo, esto desde la década de 1960. Como se mencionó en el capítulo 4 empresas como IBM, laboratorios como Batelle y asociaciones tales como la Electronic Industries Association [76], Internacional Electrotechnical Comision [77], y la American Society for Testing Materials [68,69] han desarrollado diversos ensayos sobre todo con mezclas de gases, mientras que otras, como por ejemplo Alcatel-Indetel de México (actualmente Atlinks) y Toshiba emplean pruebas como las de cámara de niebla salina. Este tipo de ensayos han sido evaluados en trabajos como los de Zakipour y Leygraf [16], quedando implícita la factibilidad de desarrollar nuevas metodologías que permitan una mejor correlación entre los fenómenos de deterioro observados durante su exposición al medio ambiente y los reportados a partir de los ensayos. Dentro de ésta línea se define la metodología propuesta la cual parte de los conceptos de ensayos acelerados [84], los que básicamente se utilizan para:

- a. Desarrollo de nuevos productos
- b. Mejorar el rendimiento de productos ya en operación

Dada la rapidez de cambio de la tecnología en la electrónica es necesario que las pruebas permitan evaluar en forma acelerada el deterioro del dispositivo, de tal forma que antes de ser liberado el producto se tenga una idea clara de cual será su comportamiento y los posibles inconvenientes que éste pudiera tener.

La necesidad de ensayos acelerados sobre todo se presenta en el caso de productos de alto desempeño. La pretensión de éstos se orienta a la estimación de la vida del elemento bajo condiciones de servicio, esto a través del empleo de extrapolaciones. En el caso bajo estudio los ensayos acelerados se orientan a la evaluación de los modos de falla, a la estimación de la vida útil y a la determinación de los problemas que se van a presentar durante el servicio.

En general existen tres métodos de acelerar el deterioro, que durante el servicio sufre un dispositivo [84], estos son:

- a. Evaluar bajo condiciones de elevada temperatura o humedad (evidentemente por arriba de las de servicio), para incrementar la velocidad de falla, esto en el caso de procesos químicos. En el caso bajo análisis se requiere además modificar la concentración de los contaminantes atmosféricos que aceleran el deterioro tal como el SO₂, NO_x, CO₂, así como de aquellos que actúan como catalizadores de las reacciones tal como el O₃.
- b. En algunas condiciones se considera que el incremento en las condiciones de servicio (por ejemplo voltajes o presiones) se puede emplear para favorecer el deterioro.

Las pruebas aceleradas de duración o tiempo de vida se clasifican en:

- a) Cuantitativas
- b) Cualitativas.

En general las pruebas aceleradas de tipo cualitativo se caracterizan por la aplicación de sollicitaciones (condiciones) severas de servicio, de tal forma que si el dispositivo sobrevive a éstas se considera que ha cumplido ante dicha sollicitación, en el caso de falla los resultados se podrán emplear para eliminar las causas que dieron lugar al inconveniente.

Este tipo de pruebas revelan los modos de falla probables. Cuando no son bien diseñadas, esto se enfatiza al presentarse modos de falla que no tienen ninguna relación con los generados durante el servicio. Entonces una buena prueba de tipo cualitativo es aquella que rápidamente da lugar a los fenómenos de deterioro observados en campo. Si bien, en general estas pruebas no cuantifican la vida del sistema bajo empleo convencional si pueden proporcionar información con relación al nivel de sollicitaciones que se pueden emplear en las subsecuentes pruebas cuantitativas. Por lo tanto, este tipo de ensayos se pueden considerar como precursores de las pruebas cuantitativas.

Por su parte las pruebas de tipo cuantitativo se caracterizan por acelerar el deterioro a través de la aplicación de sobresollicitaciones (temperatura o humedad mayores que las convencionales, o concentraciones de contaminantes superiores a las esperadas en campo), situación que se traduce en la reducción de la vida del sistema. Aquí el problema radica en determinar la relación entre el tiempo de ensayo y las condiciones en que este se efectúa con su equivalente aproximado en tiempo real. Para esto existen diferentes métodos estadísticos y modelos (Arrhenius, degradación no lineal, etc).

En el caso de equipo y dispositivos electrónicos resulta evidente que una hora de servicio solo puede ser equivalente consigo misma y que además las condiciones de operación pueden ser muy variadas. Por tal motivo es necesario reproducir en forma rápida y controlada los fenómenos que se observan en equipo en servicio, cuando éste es sometido a condiciones definidas como críticas (En México esta condición corresponde al equipo instalado en la zona costera del golfo, en particular en regiones altamente contaminadas como Coatzacoalcos y Tampico). Es por tanto que los ensayos de deterioro acelerado serán sobre todo de tipo cualitativo y deben representar el antecedente para evaluaciones cuantitativas, las cuales se podrán plantear con base en los datos generados de una primera etapa de prueba.

La problemática en el desarrollo de una prueba acelerada de tipo cuantitativo para equipo electrónico está dada por la interacción entre los diversos componentes, situación que vuelve muy compleja cualquier intención de cuantificación.

Lo anterior debe permitir el desarrollo de modelos empíricos que relacionen el deterioro o la vida de servicio en condiciones de empleo.

Como ya fue mencionado muchos de los casos de ensayos acelerados se basan en el modelo de Arrhenius ya que se considera que la degradación es un ejemplo de cinética química. En este caso se considera que la temperatura es factor fundamental en la velocidad de deterioro (esta conceptualización puede ser aplicada para deterioro de semiconductores pero no corresponde con el caso de fallas debidas a corrosión atmosférica en los dispositivos electrónicos).

Definiendo V_c como la velocidad de reacción química, la ecuación de Arrhenius se expresa como: [85]

$$V_c = A \exp(-E_a / kT) \quad 5.1$$

donde:

E_a : energía de activación

K : Constante de Boltzmann

T : Temperatura en escala absoluta

A : Constante que depende del sistema

Si la vida "d" de un producto se limita a un determinado monto de degradación "a", entonces ésta se puede expresar como:

$$d = a / V_c \quad 5.2$$

Definiendo una nueva variable A' , de tal forma que:

$$A' = a / A \quad 5.3$$

Entonces

$$d = A' \exp(E_a / kT) \quad 5.4$$

La ecuación 5.4 expresa la relación entre la temperatura y la duración o vida de servicio del elemento. Si los mecanismos de falla son congruentes, se pueden graficar $\ln(d)$ contra el inverso de la temperatura ($1/T$), obteniendo entonces una relación lineal entre ambos factores, de tal forma que la aceleración obtenida al pasar de la temperatura de servicio (T_0) a la de prueba (T_p) está dada por $\ln(d_1) / \ln(d_2)$.

Suponiendo que el coeficiente de aceleración es α , esto entre las temperaturas T_1 y T_2 , para las cuales la vida de servicio es d_1 y d_2 respectivamente, entonces el coeficiente de aceleración podrá ser obtenido por:

$$\alpha = d_2 / d_1 = \exp \{ (E_a/k)(1/T_1 - 1/T_2) \} \quad 5.5$$

En conclusión, el modelo de Arrhenius es aplicable para considerar los efectos de aceleración por temperatura solamente. Otros modelos de falla, por ejemplo el Eyring son empleados para considerar los efectos de humedad, voltaje y sollicitaciones mecánicas; en adición al efecto de la temperatura.

Para este caso la duración promedio (vida) en función de la temperatura y sollicitaciones se puede expresar por:

$$\ln d = A + (B / T) - \alpha \ln (s) \quad 5.6$$

Donde:

A, B, a : constantes que dependen del sistema

T : Temperatura en escala absoluta

S : Otras sollicitaciones diferentes de la temperatura.

5.2 CONDICIONES DEL ENSAYO PARA SIMULAR EN FORMA ACELERADA EL DAÑO POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

Considerando lo expuesto, la prueba a desarrollar deberá cumplir con las siguientes condiciones:

- i. Repetitividad
- ii. Facilidad de desarrollo
- iii. Ser capaz de reproducir los fenómenos de deterioro observados durante la vida útil del sistema o dispositivo.
- iv. Bajo costo
- v. Rapidez

El ensayo será de tipo cualitativo debiendo proporcionar las bases para definir posteriormente aspectos cuantitativos.

Considerando lo propuesto en la literatura [16,75] y los estándares establecidos por diferentes sociedades técnicas [10,11,12,13,14,15,45,46,47,68,69], se concluye la conveniencia de desarrollar una prueba que se caracterice por:

- i. Cámara ambiental
- ii. Flujo de gases mezclados. Se dispondrá de los gases que mayor efecto presentan en el deterioro del equipo electrónico.
- iii. Humedad relativa controlada en un rango entre 40 y 95%.
- iv. Presencia de ozono como agente que promueve el fenómeno.
- v. Los aparatos o tarjetas electrónicas a ser evaluadas podrán estar tanto en posición vertical como horizontal para analizar efectos de depósito y escurrimiento.
- vi. La temperatura variará cíclicamente para permitir condiciones de evaporación y condensación en la superficie de las tarjetas.

Esta prueba combina los efectos de ensayos de mezcla de gases, los cuales se caracterizan por la presencia de 2 o más gases contaminantes a una temperatura y humedad constante [10,11,12,13,14,15] con aquellos de cámara ambiental en los que se pueden generar ciclos de temperatura. Es por tanto que la metodología propuesta considera una combinación de ambos efectos.

5.3 DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS DE ENSAYO

A partir de los resultados del análisis de deterioro de las tarjetas electrónicas (los cuales orientan en cuanto a los modos de falla) y considerando que:

- a. Los especímenes se caracterizan por haber estado expuestos a diferentes grados de corrosividad.
- b. Se conocen peculiaridades y tiempo de servicio de las muestras.
- c. Se ha realizado un análisis de los resultados de los ensayos reportados en la literatura [6,16,85]

Se definen las características del ensayo a desarrollar, las cuales son:

- i. Duración de la prueba; 200 ciclos
- ii. Humedad relativa controlada entre 80 y 95%.
- iii. Gases contaminantes: O₃, SO₂, NO₂, existiendo la posibilidad de un tercer contaminante gaseoso (por ejemplo CO₂)
- iv. Concentración de gases contaminantes. Mínimo 100 veces la máxima para atmósfera industrial (se pretende acelerar el deterioro).
- v. Duración del ciclo de temperatura; 30 minutos.
- vi. Tipo de ciclo de temperatura; Onda trapezoidal (facilita el control del ciclo e incrementa los tiempos de condensación)
- vii. Temperatura máxima de 45° C y mínima de 5° C. Esto se estableció de acuerdo a las capacidades del equipo y considerando que no se presente solidificación del condensado.

Para garantizar que las condiciones del ensayo se cumplan, el sistema de prueba se caracterizará por:

- viii. Mezcla de los gases a baja velocidad. Para tal fin el equipo dispondrá de ventiladores en el interior de la cámara.
- ix. La mezcla de gases no debe incidir directamente sobre las muestras. El sistema contará con deflectores para el flujo de gas.
- x. Disponer de sistemas de evaluación y control de los contaminantes presentes.
- xi. Contar con un sistema de control de temperatura y humedad.
- xii. Operar en forma automática, de acuerdo a las condiciones de ensayos establecidas. Asimismo permitirá el almacenamiento de los datos relevantes de la prueba.

Duración del ensayo. Los diferentes ensayos reportados en la literatura [16] y aquellos normalizados [10,11,12,13,14,15] se realizan en general en periodos variables (desde horas hasta semanas). Básicamente todos éstos se pueden clasificar como cualitativos, es por tanto que dichas pruebas son de aceptación/rechazo, donde la decisión estará supeditada a las consideraciones planteadas inicialmente. El ensayo propuesto, si bien es en principio de tipo cualitativo, este se diferencia al partir de la premisa de simular condiciones similares a las que se presentan durante la vida útil del equipo, cuando éste es expuesto a condiciones críticas. Dado que la propuesta es la de generar ciclos de temperatura que garanticen la existencia de procesos de condensación-secado, en forma similar a lo que sucede en la vida útil del equipo. Es por tanto que más que referir a la duración del ensayo esta condición se describe a través del número de ciclos térmicos aplicados.

Humedad Relativa. Si bien existe una amplia discrepancia en cuanto al valor mínimo de la humedad relativa al cual se presentan efectos de deterioro, ya que mientras algunos autores se refieren a éste como del 80% [2] otros indican que prácticamente no existe un valor mínimo y que se pueden presentar problemas aún para valores tan bajos como el 20% [20]. La experiencia obtenida en el análisis del deterioro de tarjetas impresas de aparatos telefónicos de uso residencial indica que si bien no existe un valor mínimo perfectamente identificado, si se presenta un efecto sensible al exponerse en ambientes de elevada humedad relativa como los característicos de las zonas costeras. Es por tanto que se ha concluido en la conveniencia de trabajar con elevadas

humedades relativas, garantizando el control de esta variable a través de un sistema de retroalimentación de la señal.

Concentración de contaminantes. Diferentes autores [2,3,20] coinciden en que dos de los principales contaminantes en el caso de la corrosión atmosférica son el SO_2 y los cloruros, si bien dada la regularidad con la que se presentan otros contaminantes como el H_2S , NO_x , ha dado por consecuencia que se realicen diversos estudios [17,18,21] en los que se analiza el efecto de éstos así como la acción del ozono [22,24]. Se ha definido también que concentraciones de contaminantes muy por debajo de los umbrales de aceptación para el ser humano [20] generan problemas en el equipo y dispositivos electrónicos. En este punto es conveniente enfatizar que las concentraciones máximas aceptables para el ser humano son en general del orden de ppb, por lo que se plantea como factor de aceleración del daño exponer las muestras a concentraciones del orden de ppm. Dicha situación será favorable desde el punto de vista de la evaluación de los contaminantes, ya que los dispositivos y sensores incrementan su costo al trabajar en ordenes de ppb. Por lo tanto se propone que los ensayos se realicen con una concentración de contaminantes del orden de 10 ppm de ozono, 100 a 200 ppm de SO_2 , 20 a 30 ppm de NO_2 , 100 a 200 de CO_2 , esto en el caso de considerarse éste último gas.

Duración del ciclo. Con la finalidad de garantizar los efectos de condensación-secado en la superficie de los dispositivos, se propone una duración de éste del orden de 30 minutos, periodo que puede ser fácilmente reprogramado a través del sistema de control.

Consideraciones del ciclo. Se propone que el ciclo térmico se ajuste a una señal de tipo trapezoidal, de tal forma que los tiempos de permanencia en los límites inferior y superior de la temperatura sean del orden de 3 minutos quedando un intervalo de 12 minutos tanto para el ciclo de calentamiento como de enfriamiento.

Temperaturas extremas. En general, en ensayos de corrosión atmosférica las temperaturas son del orden de la ambiente, ya que se considera que la velocidad de deterioro no es afectada por este factor, esto en función de los límites prácticos que al caso corresponden. Por otra parte se considera que el tiempo de humectación [2] está definido por la combinación de una temperatura superior a los 0°C combinada ésta con una humedad relativa mayor o igual a 80%. Por otra parte se consideró que en general el equipo y dispositivos electrónicos rara vez se encuentran en condiciones ambientales para las que la temperatura supere los 45°C , con esta base y tomando en consideración la problemática de generar a través de una bomba de calor, temperaturas superiores a los 50°C , se definieron los límites inferior y superior del ciclo de temperaturas.

Peculiaridades del ensayo. Una de características distintivas que se persigue es la de disponer de un control preciso de las variables del ensayo (humedad relativa, temperatura, concentración de contaminantes), a la vez de versatilidad, definido esto a través de la posibilidad de reprogramar con facilidad los parámetros del ensayo. Para tal fin se requiere un sistema de control de lazo cerrado.

5.4. DISEÑO CONCEPTUAL

Dadas las características demandadas al equipo, éste deberá disponer de los siguientes subsistemas:

- a. Calentamiento y enfriamiento
- b. Humidificación
- c. Suministro de los gases contaminantes
- d. Generador de ozono
- e. Programación, control y registro de datos.
- f. Monitoreo

Sistema de calentamiento y enfriamiento. Con base en las características del ensayo se determinó que para garantizar los ciclos de calentamiento y enfriamiento, así como su control, se requería de una bomba de calor. Se descartó el empleo de un sistema de refrigeración convencional en conjunto con un banco de resistencias eléctricas, para evitar cualquier inconveniente con el elemento calefactor. La bomba de calor se diferencia del ciclo de refrigeración ya que a través de una válvula de 4 vías, puede orientar el flujo, de tal forma que el serpentín correspondiente a la zona del evaporador y el condensador puedan ser alternados de acuerdo a las necesidades del sistema. Esto es el serpentín que se encuentra en el ducto de la cámara puede hacer las veces de evaporador, y entonces enfriar la masa de aire circulante en la cámara, ó en su defecto actuar como condensador del sistema de tal forma que se caliente el aire de la cámara. Dadas las condiciones de transferencia de calor durante el calentamiento del aire de la cámara, este proceso presenta una limitada velocidad a la vez de restringir la máxima temperatura que puede alcanzar el sistema.

El empleo de la bomba de calor, si bien limita las velocidades de calentamiento, favorece la programación y control del equipo. El único problema en su selección lo representa la capacidad de los equipos comerciales, ya que la menor es de 1.5 toneladas de refrigeración, esto es 18000 BTU/hr (5.275 Kw), la cual supera con mucho los requerimientos, dados por el volumen del aire a manejar (1 m³), y de la rapidez de calentamiento y enfriamiento (12 minutos). Este aparente sobredimensionamiento del equipo permite que no se presente sobrecalentamiento en el fluido de trabajo de la bomba de calor. En este caso el control del equipo se realizará con base a la temperatura de la masa de aire en el interior de la cámara, señal que será determinada a través de un sensor de tipo semiconductor.

Sistema de humidificación. La humidificación de la masa de aire en el interior de la cámara se puede controlar a través de la integración de un humidificador comercial, el control on/off de éste se realizará con base en la medición de los sensores instalados para tal efecto.

Suministro de gases contaminantes. El sistema se conceptualizó para disponer de hasta tres alimentaciones de gases contaminantes, quedando la posibilidad de integrar un mayor número de éstos. La alimentación es a través de electroválvulas, de tal forma que el control se realiza mediante un sistema on/off controlado por un microprocesador. Esta situación facilita su programación y simplifica el sistema. Dadas las peculiaridades de cada uno de los posibles contaminantes se considera que uno de éstos es el SO₂, quedando, por el momento, dos canales vacantes, los cuales pueden ser empleados para cualquier otro contaminante gaseoso que se

considere conveniente. La obtención de una atmósfera contaminada a partir de la inyección de gases comerciales se justifica por las ventajas que se obtienen del control de estas variables a partir del monitoreo de su concentración y la posibilidad de ajuste de ésta mediante un sistema de control de lazo cerrado. La aplicación de SO_2 además de deseable no representa mayor problema, al tratarse de un gas de uso corriente. Sin embargo, no se puede afirmar lo mismo con relación al NO_2 , ya que no existe comercialmente ningún tipo de NO_x , disponiéndose exclusivamente de óxido nitroso (N_2O). El inconveniente radica en que el N_2O es considerado como un compuesto extremadamente estable y no se considera en general en la literatura que éste participe en ninguna reacción que pueda traducirse en deterioro de algunos metales. Por su parte el CO_2 es factible de obtenerse comercialmente, por lo que su aplicación no representa ningún inconveniente.

Generador de ozono. En el caso del ozono la literatura consultada refiere a éste [21,22,24,25,26,27] como un catalizador de las reacciones, situación que se traduce en la conveniencia de disponer de algún dispositivo que permita su generación así como de los sensores que garanticen se encuentre en los límites preestablecidos. Considerando la concentración requerida, así como las dimensiones de la cámara se concluye en la conveniencia de disponer de un generador del tipo de arco eléctrico.

Sistema de programación, control y registro de datos. El sistema debe realizar el control y monitoreo de las variables en tiempo real, a la vez de registrar los eventos que se presentan durante la prueba. Por esta razón es conveniente el diseño de una interfase con un equipo PC. El ordenador permite la reprogramación del sistema en forma sencilla. Esto mediante una tarjeta diseñada *ex profeso*, la cual cuenta con un microprocesador, que controla los diferentes subsistemas del equipo.

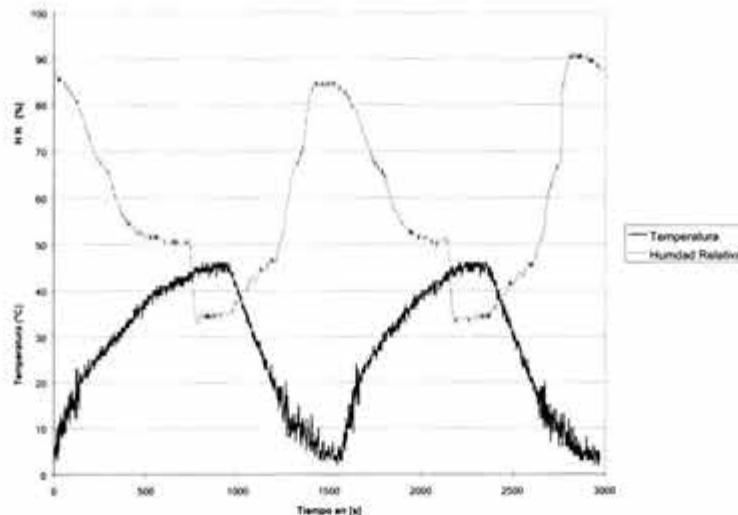


Figura 5.1 Ciclo de temperatura y humedad, esto de acuerdo a los datos registrados por los sensores de la cámara

Sistema de monitoreo. Las variables a monitorear son la temperatura, humedad relativa y la concentración de los gases contaminantes y del ozono. En el caso de la temperatura y humedad relativa esto se realiza a través de sensores instalados en el interior de la cámara (2 de cada uno), con lo que se obtiene una evaluación continua y en tiempo real de dichas variables (figura 5.1). Dadas las limitaciones, costos y sensibilidad de los diferentes equipos empleados para evaluar la concentración de los contaminantes y el ozono se considera que la solución más conveniente es el monitoreo discreto. Éste se realiza colocando los sensores en la cámara cada vez que se requiere una lectura. De acuerdo al procedimiento planteado esto será cada hora, de tal forma que en base a los resultados sea factible programar la apertura de las electroválvulas de aquellos contaminantes que se encuentren por debajo de umbral de prueba especificado. En el caso de la humedad la señal del sensor correspondiente permite la activación del control on/off correspondiente, situación que se realiza en forma totalmente automática

El resultado de las propuestas planteadas se presenta en la figura 5.2.

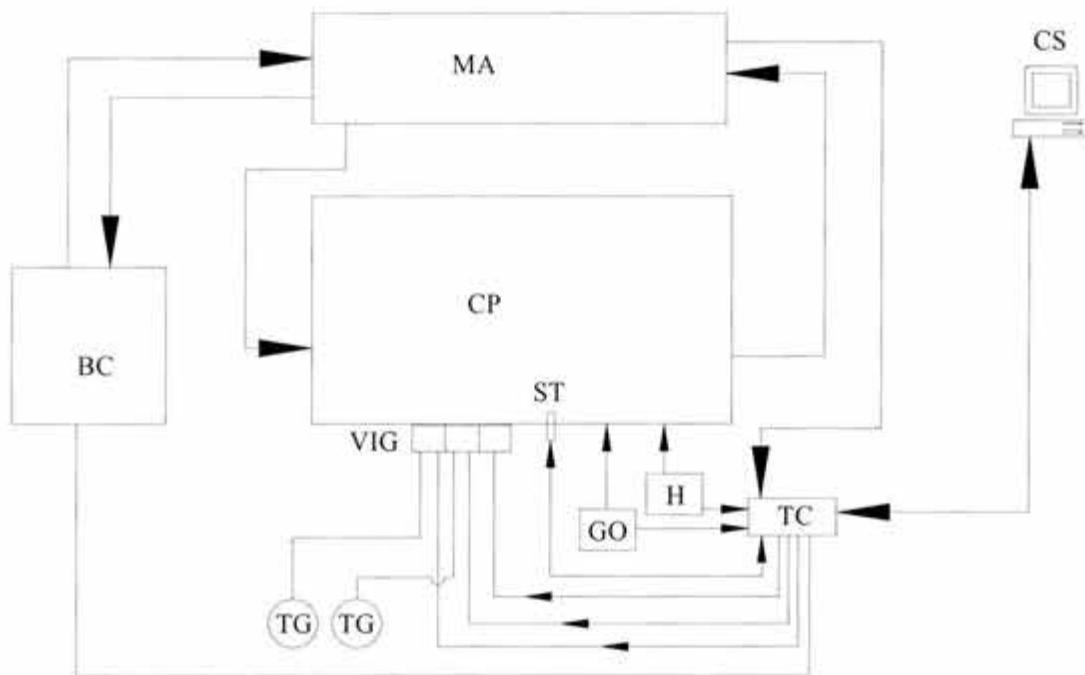


Figura 5.2 Descripción esquemática del sistema de ensayos acelerados de corrosión.

- MA- Manejadora de aire.
- BC- Bomba de Calor.
- CP- Cámara de pruebas.
- ST- Sensores de temperatura.
- VIG-Electroválvulas para inyección de gases contaminantes.
- TG- Tanque de gas.
- GO- Generador de ozono.
- H-Humidificador.
- TC- Tarjetas de control.
- CS- Control del sistema.

5.5 DISEÑO DE DETALLE

Se realizó a partir de la selección de la bomba de calor, ya que las características geométricas y dimensionales de la manejadora de aire permiten definir las dimensiones de la estructura y la posición de los diferentes sistemas, que al integrarse dan lugar a la cámara de ensayos acelerados de corrosión.

En lo que se refiere a las dimensiones de la cámara de prueba, éstas se definen con base en el número, tamaño y geometría de los especímenes a probar. Dado que el sistema en primera instancia está orientado (pero no restringido) a equipos telefónicos de uso residencial, se definió la distribución física que se presenta en la figura 5.3, de tal forma que se pudieran colocar hasta tres equipos en posición horizontal así como en posición vertical.

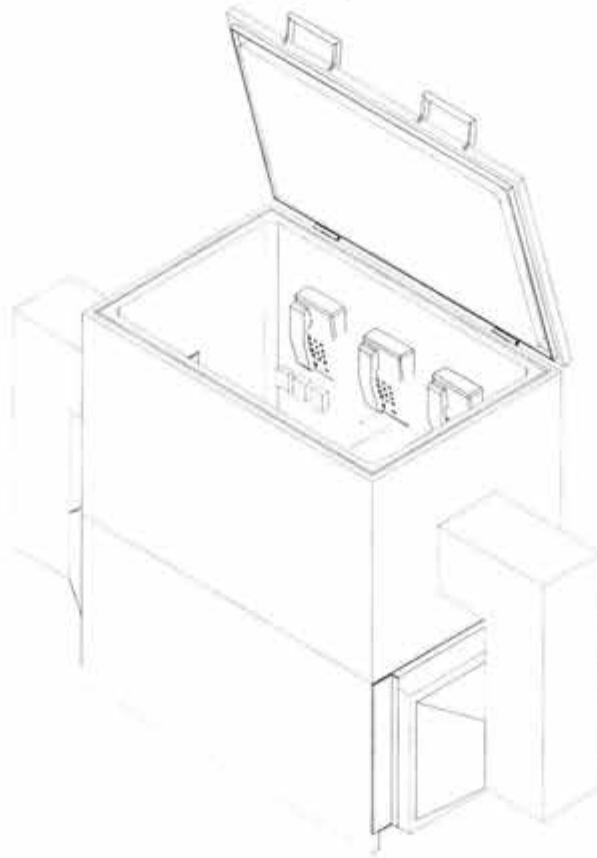


Figura 5.3 Disposición del sistema

Elementos estructurales. La estructura representa el soporte de los diversos elementos que integran el sistema (figura 5.4), de acuerdo a las estimaciones realizadas la carga a soportar es inferior a los 1000 N, quedando el centroíde en la parte inferior del sistema, que es precisamente donde va colocada la manejadora de aire. Las condiciones de carga impuestas a la estructura, así como sus mínimas restricciones en cuanto a resistencia al deterioro, aunado a la facilidad de ensamble y costos de la materia prima; dieron como resultado que el material idóneo sea el perfil estructural de acero (PTR). El uso de perfiles de acero facilita la construcción y reduce sensiblemente los costos de la estructura. Una opción alterna es el empleo de perfiles de aluminio extruído, situación que se traduce en un mayor costo de materiales y mano de obra.

Para evitar inconvenientes por contaminación, así como el deterioro por corrosión de los elementos interiores de la cámara (los cuales estarán en contacto con la atmósfera contaminada), es necesario producir todos éstos en fibra de vidrio. La excepción está dada por la estructura de la manejadora de aire, la que se recubre con un revestimiento epóxico para evitar problemas producto de la corrosión. Con el fin de limitar el flujo de calor al exterior, el sistema se diseño con una doble pared, donde los elementos internos son de fibra de vidrio, mientras que la carcasa exterior es de chapa de aluminio anodizado. Así se garantiza la durabilidad y resistencia del sistema. Por otro lado, para limitar los flujos de calor se emplea espuma de poliestireno entre ambas paredes de la cámara.

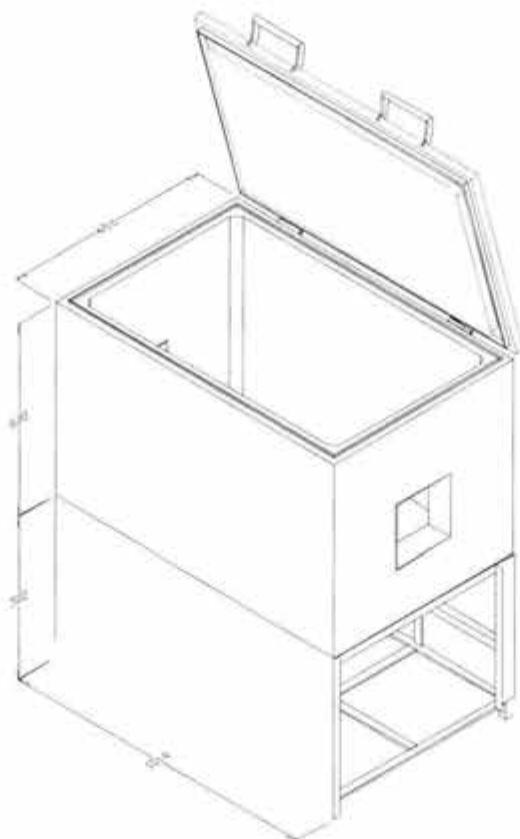


Figura 5.4 Descripción esquemática de la estructura.

Sistema de monitoreo En cuanto al sistema de monitoreo y control esto se hace a través de 3 sensores de temperatura y 2 de humedad, distribuidos en el interior de la cámara. Los datos en el caso de humedad permiten el análisis del proceso mientras que la señal de temperatura en conjunción con la de un temporizador permiten al programa el control de las funciones de la manejadora de aire y bomba de calor. El monitoreo de la concentración de contaminantes se realiza en forma discreta, de tal manera que en base a los resultados obtenidos se reprograma el sistema, para garantizar así que el nivel de contaminantes se encuentre siempre en los rangos establecidos.

Almacenamiento de datos y programación

El control del sistema se realiza a través de la programación de un microprocesador, para lo cual fue diseñada una tarjeta de comunicación y control, de tal forma que el sistema se opera a través de una PC, permitiendo la programación del sistema y el ajuste de los siguientes parámetros:

- a) Temperaturas máximas y mínimas de ensayo
- b) Número de ciclos
- c) Duración del ciclo
- d) Humedad relativa
- e) Tiempo de apertura de electroválvulas para suministro de gases contaminantes
- f) Encendido y apagado del generador de ozono

A través de esto se pueden modificar las condiciones de ensayo, permitiendo al sistema trabajar de manera independiente mientras exista suministro de energía eléctrica. Asimismo en el disco duro se almacenan todos los datos del proceso para su posterior análisis. La única actividad en la que el sistema requiere de una operación manual es para la medición de los contaminantes presentes, ya que resulta demasiado costosa la instalación de un sistema de control de lazo cerrado, que a la vez de monitorear la concentración de contaminantes, envíe la señal para la inyección de una mayor masa de éstos o de aire limpio.

A partir de las consideraciones establecidas se procedió a la construcción del equipo (figuras 5.5, 5.6), quedando integrado de acuerdo al diagrama de la figura 5-7

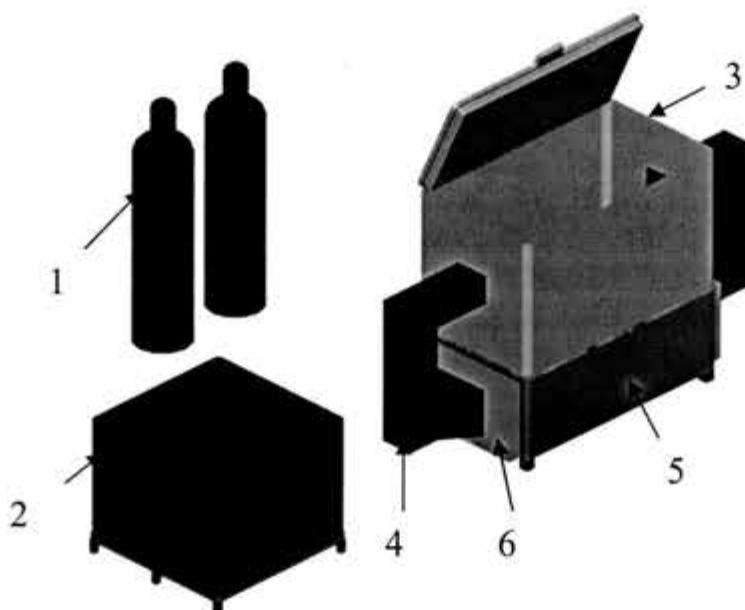


Figura 5.5 Descripción esquemática de los elementos principales que integran el sistema de pruebas aceleradas de corrosión.

- 1.- Gases
- 2.- Bomba de calor
- 3.- Cámara
- 4.- Ducto de recirculación de aire
- 5.- Mesa de soporte de la cámara
- 6.- Manejadora de aire

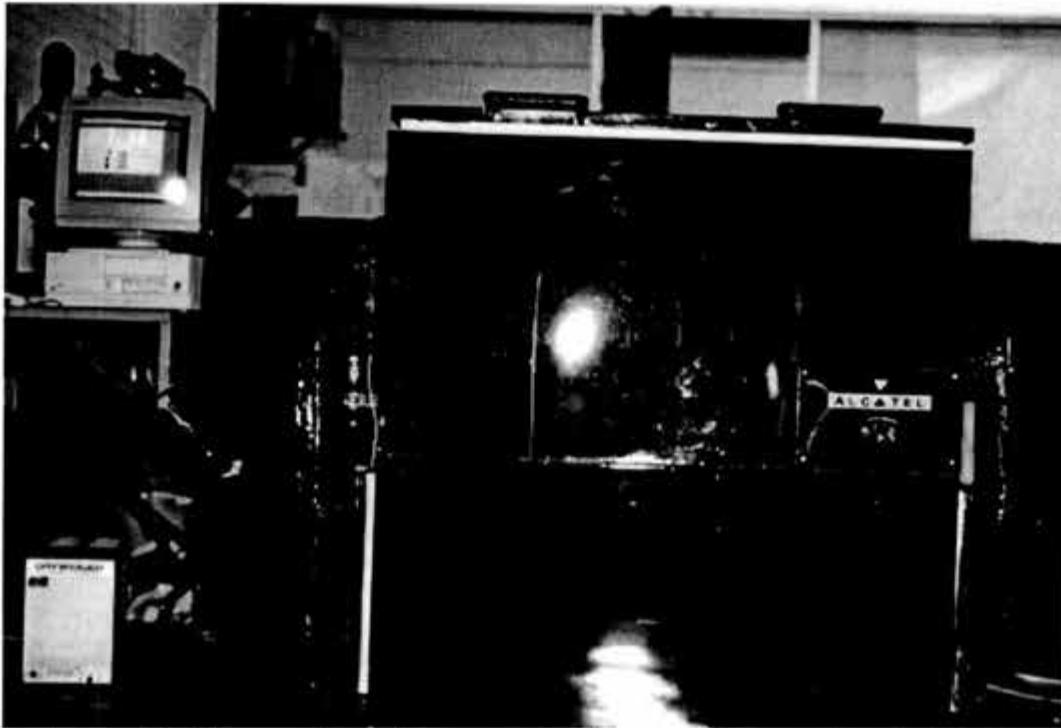


Figura 5.6a Cámara de pruebas aceleradas de corrosión en equipo electrónico.

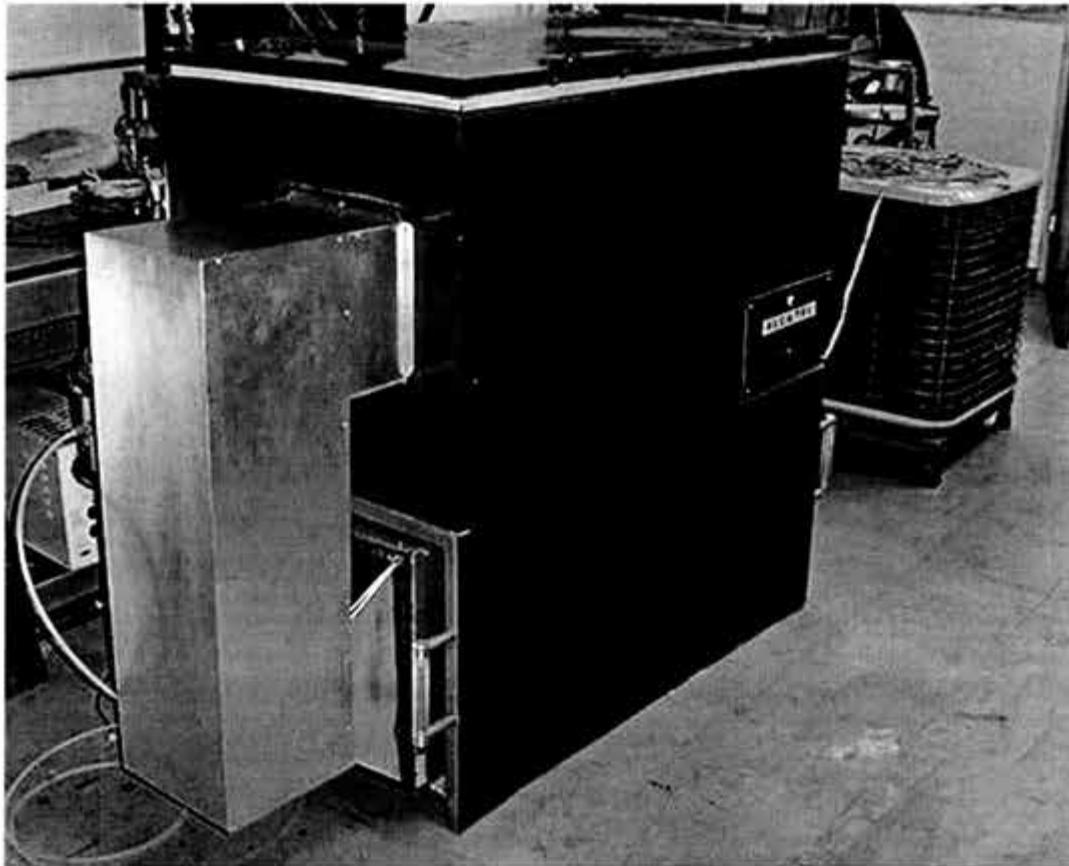
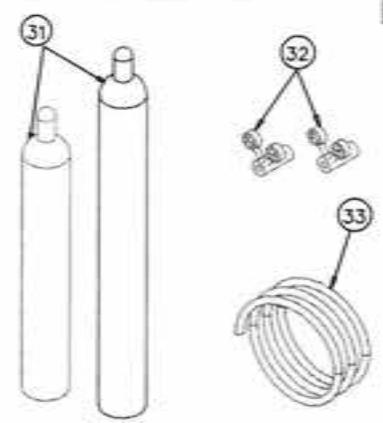
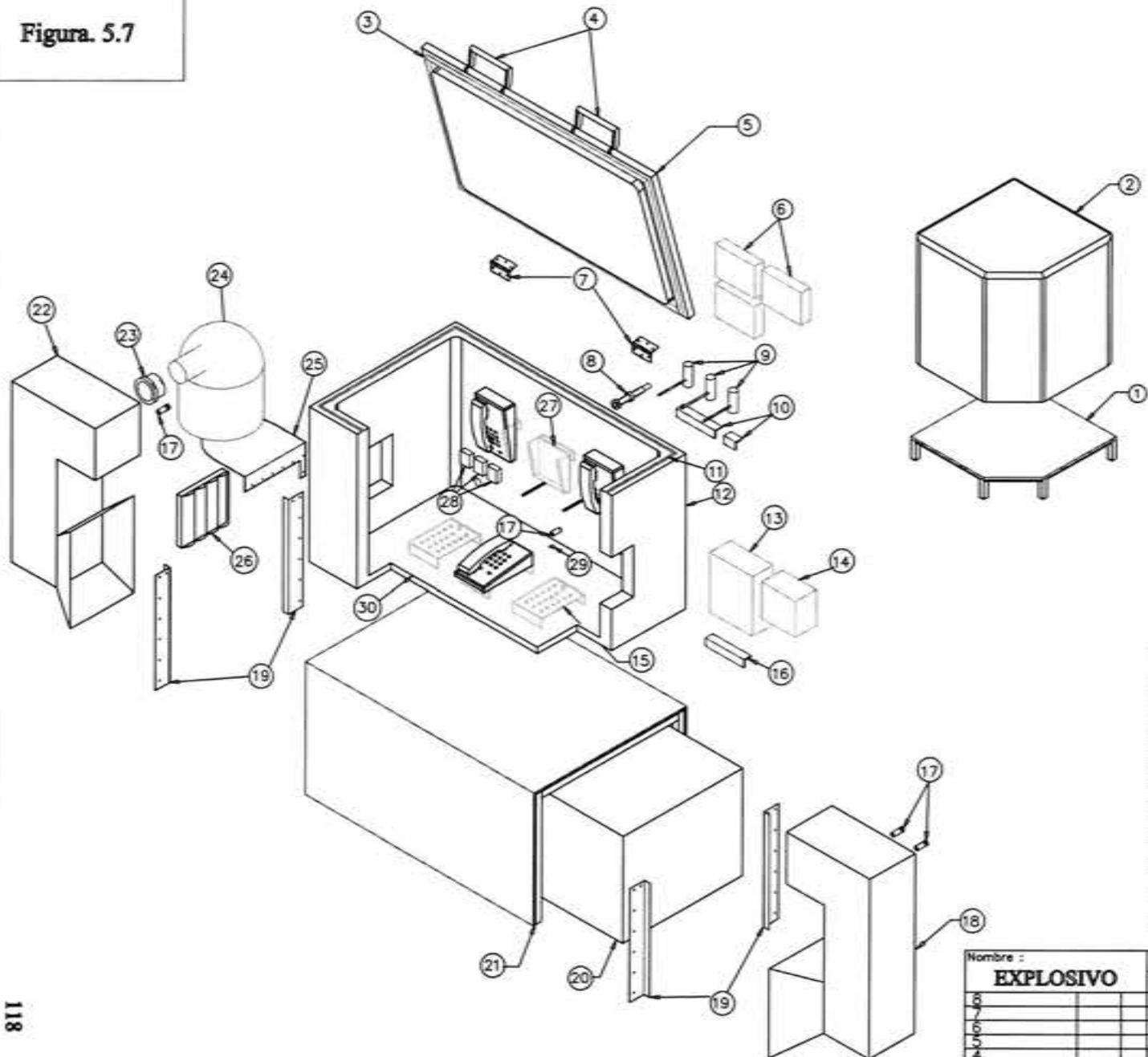


Figura 5.6b Cámara para ensayos acelerados de corrosión en equipo electrónico.

Figura. 5.7



No. de identificación	Artículos Comerciales
24	Humidificador
2	Bomba de calor
20	Manejador de aire
9	Electro-válvulas
26	Deflector de aire
4	Manijas
7	Bisagras
28	C. de conex. de teléfonos
6	Cajas de borietas
10	Replicas de electro-válvulas
11	Imán
3	Empaque imantado
13	Generador de ozono
14	Fuente
16	Soporte de gen. de ozono
29	Sistema de drenaje
32	Manómetros
33	Mangueras

Número de plano	Nombre de la pieza	Código	No. de identificación
FI-01	Tapa de cámara	COR-TC	5
FI-02	Mesa	COR-M	21
FI-03	Tina interior	COR-TI	30
FI-04	Tina exterior	COR-TE	12
FI-05	Ángulo de sujeción	COR-AS1	19
FI-06	Ángulo de sujeción	COR-AS2	19
FI-07	Ángulo de sujeción	COR-AS3	19
FI-08	Ángulo de sujeción	COR-AS4	19
FI-09	Ducto izquierdo	COR-DI	22
FI-10	Ducto derecho	COR-DO	18
FI-11	Replica de humidificador	COR-RH	25
FI-12	Base de bomba	COR-BB	1
FI-13	Base de teléfono horizontal	COR-BTH	15
FI-14	Base de teléfono lateral	COR-BTL	27
FI-15	Soporte de sensores	COR-SS	17
FI-16	Cable de humidificador	COR-CH	23
FI-17	Ducto de salida de cables	COR-DSC	8

Nombre:	Acot: s/acot.	FI-UNAM
EXPLOSIVO	Escala: s/e	
6	4	Cámara de Pruebas Aceleradas de Corrosión Atmosférica
7	3	
8	2	
9	1	
10	Nº	Archivo: CAPACA
11	Material	
12	Código:	Hoja: 1/3
13	EXPLO	
14	Dibujo: I.C.G. Revisó: A.O.P. Diseñó: A.O.P.	No. de plano
15	Fecha: 02/02/2002	

Capítulo 6 Evaluación del comportamiento del equipo de simulación acelerada

6.1 METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Una vez construido el equipo y concluidas sus pruebas de operación iniciales, las cuales se orientaron a evaluar el funcionamiento de los diferentes sistemas, se procedió a definir una estrategia para determinar la similitud entre los fenómenos de deterioro observados en los dispositivos sometidos a servicio, con lo generado en forma acelerada en la cámara. Para esto se estructuraron pruebas en:

- a. Probetas patrón de metales y aleaciones comúnmente empleados en sistemas y dispositivos electrónicos
- b. Tarjetas telefónicas de manufactura reciente

A partir de los resultados obtenidos es posible confirmar la capacidad del sistema para reproducir el deterioro observado en campo, situación analizada y discutida en el capítulo 4. Al confirmar la similitud de los fenómenos generados en forma acelerada con los observados para las muestras retiradas de servicio se garantiza la factibilidad de emplear el sistema propuesto como un ensayo acelerado de tipo cualitativo para sistemas electrónicos.

6.2 PRUEBAS EN CUPONES DE METALES Y ALEACIONES COMÚNMENTE EMPLEADAS EN EQUIPO ELECTRÓNICO

En esta etapa de la evaluación del sistema se emplearon probetas patrón de metales y aleaciones comúnmente empleados en sistemas y dispositivos electrónicos, así como también para las carcasas de los mismos. Por tal motivo se prepararon muestras de chapa de aluminio, cobre, latón, lámina galvanizada y lámina negra. El empleo de materiales como cobre, latón y aluminio se definió por la frecuencia en la que se encuentran éstos en conectores y pistas, por su parte la lámina galvanizada se encuentra en las jaulas de Faraday de los aparatos telefónicos, así como en las estructuras de los equipos. Las probetas de lámina negra se emplearon simplemente como patrones de comparación.

Las muestras se sometieron a 40 ciclos de prueba con base en la metodología previamente definida (temperatura de 5 a 45 °C, humedad de 80 a 95% y contaminantes N₂O, SO₂, esto además de la inyección de ozono al flujo). Las muestras, una vez terminado el ensayo, se retiraron de la cámara, siendo colocadas en bolsas de polietileno selladas para limitar cualquier ulterior deterioro.

Las probetas se inspeccionaron a bajos aumentos para evaluar la presencia de productos de corrosión, para por último proceder a la inspección en el microscopio electrónico de barrido y a su análisis mediante EDS. En las figuras de la figura 6.1 a la 6.23 se presentan diversas características de los depósitos formados en los cupones de los materiales sometidos a prueba.

Muestras de aluminio

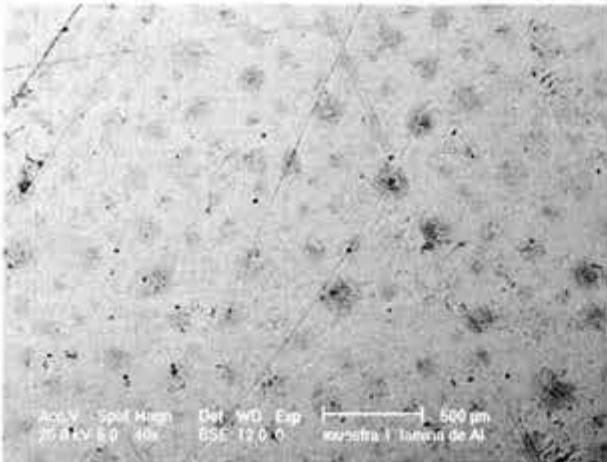


Figura 6.1 Nódulos de óxido de aluminio hidratado

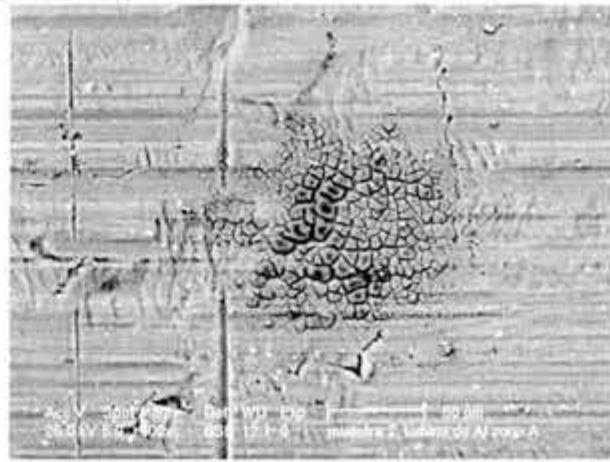


Figura 6.2 Detalle de los nódulos mostrados en la figura anterior. Se trata de óxido de aluminio hidratado.

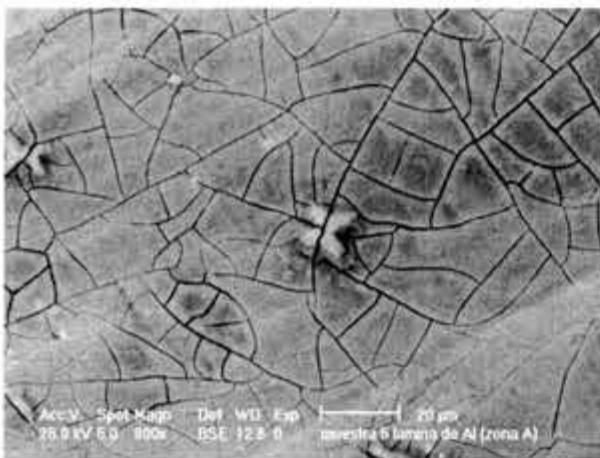


Figura 6.3 Etapa intermedia en la formación de los depósitos

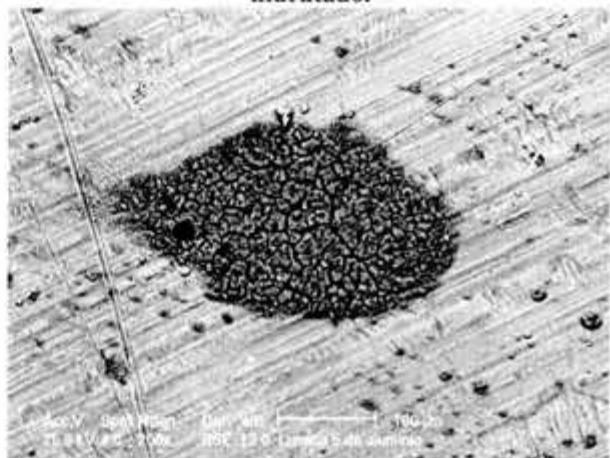


Figura 6.4 La imagen corresponde a una zona diferente de la figura anterior, resulta evidente las diferencias en el depósito. En general, en todas las muestras los análisis con EDS indican la presencia de cantidades apreciables de azufre por lo que se debe considerar la presencia de compuestos de éste.

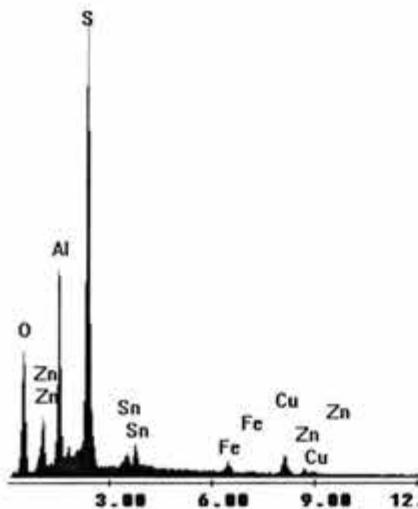


Figura 6.5. Espectro de la figura 6.4

Tabla 6.1 Composición del depósito de la figura 6.4

Elemento	Wt %	At %
O K	15.55	23.85
AlK	79.85	72.63
S K	4.6	3.52
Total	100	100

Muestras de cobre

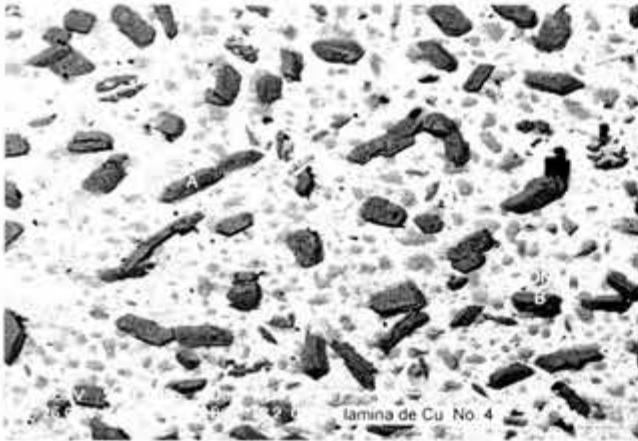


Figura 6.6 Aspecto general de la formación de depósitos en la superficie de las muestras de cobre.

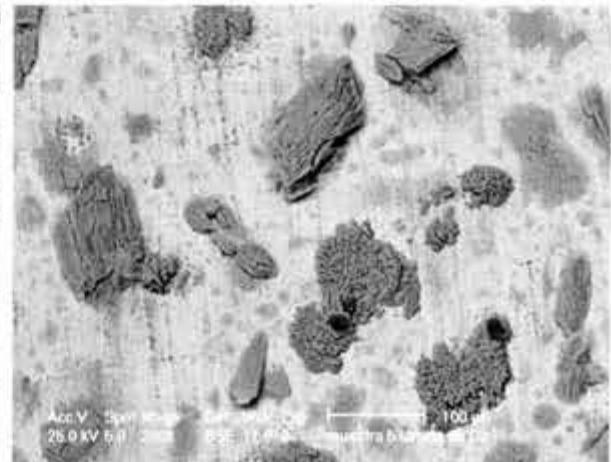


Figura 6.7 La morfología de los depósitos evidencia diversas etapas de la formación de éstos. Las cuales se caracterizan por similar composición química y diferencias sensibles en la microestructura



Figura 6.8 El depósito presenta una estructura de hojuelas y una orientación preferencial de crecimiento.



Figura 6.9 Etapa intermedia en la formación del depósito.

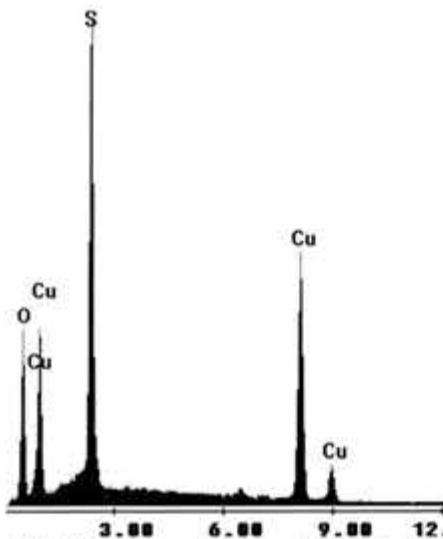


Figura 6.10. Espectro correspondiente a la figura 6.8

Tabla 6.2 Composición del depósito de la figura 6.8

Elemento	Wt %	At %
O K	25.69	50.97
S K	24.29	24.04
CuK	50.02	24.99
Total	100	100

En casi todos los análisis realizados se encuentra la presencia de azufre, por lo que se supone se trate de combinaciones de CuO y CuSO_4

Muestras de latón

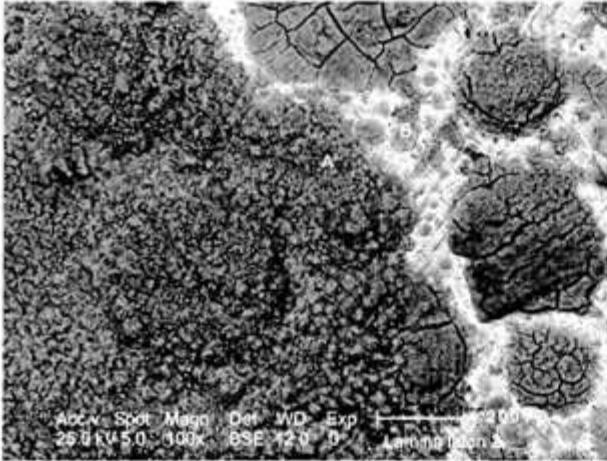


Figura 6.11. Los depósitos en las muestras de latón difieren sensiblemente en su morfología con los observados en las piezas de cobre, ya que pueden presentarse combinaciones de compuestos de zinc y cobre (A) o donde el cobre es dominante (B)



Figura 6.12. Los depósitos se caracterizan por ser usualmente porosos

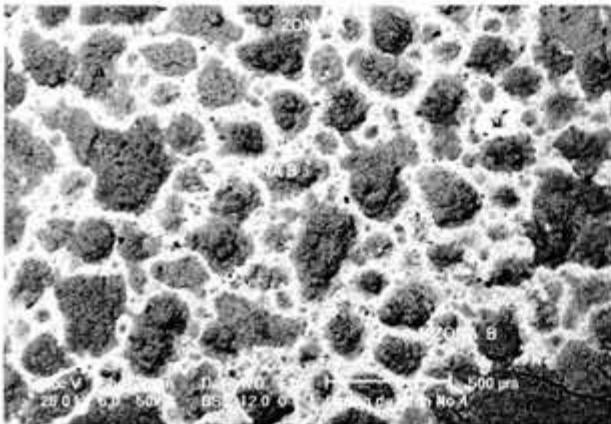


Figura 6.13 Tanto para el cobre y como para el latón se identificó la presencia de compuestos de azufre y oxígeno.



Figura 6.14. Con mayores ampliaciones se constata que la formación del depósito se efectúa en dos etapas, caracterizándose la primera capa por su menor porosidad. Sin embargo, el cambio de volumen con respecto al material original da como consecuencia su fractura.

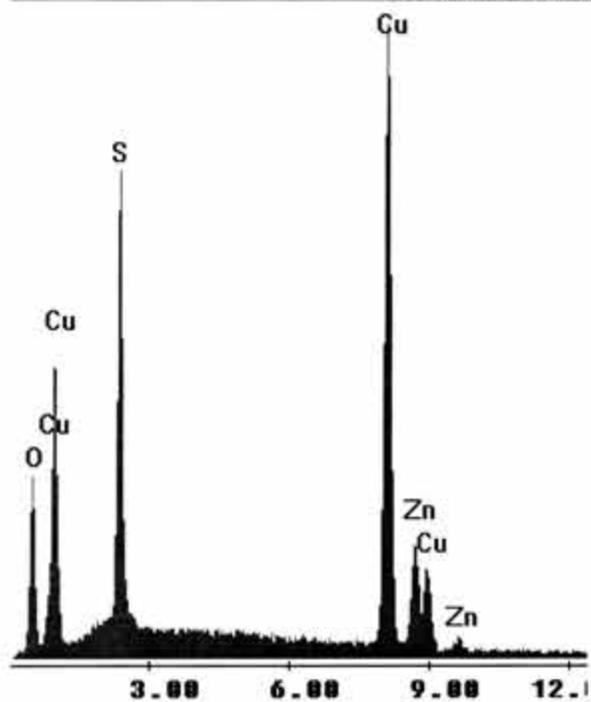


Tabla 6.3 Composición del depósito (A) de la figura 6.11

Elemento	Wt %	At %
O K	16.3	39.6
S K	16.23	19.67
CuK	36.43	22.28
ZnK	31.04	18.45
Total	100	100

Figura 6.15. Espectro correspondiente a la región A de la figura 6.11

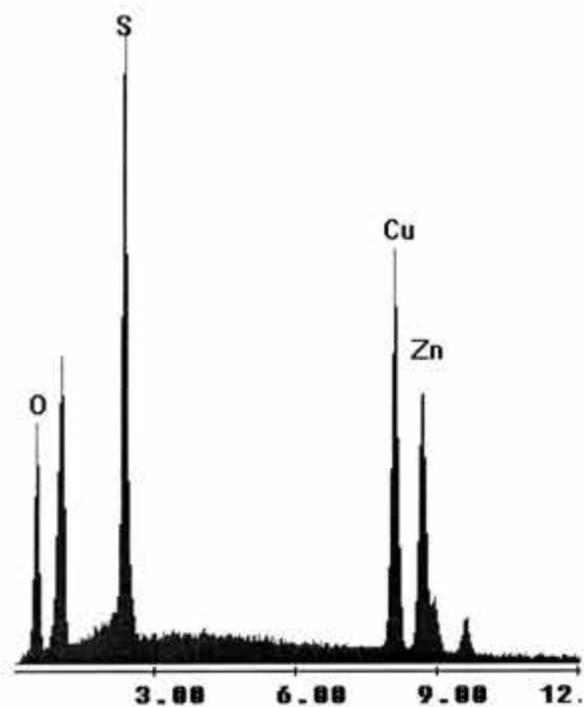


Tabla 6.4 Composición del depósito (B) de la figura 6.11

Elemento	Wt %	At %
O K	12.35	32.99
S K	12.56	16.74
CuK	61.78	41.56
ZnK	13.31	8.7
Total	100	100

Figura 6.16. Espectro correspondiente a la región B de la figura 6.11

Muestras de acero galvanizado

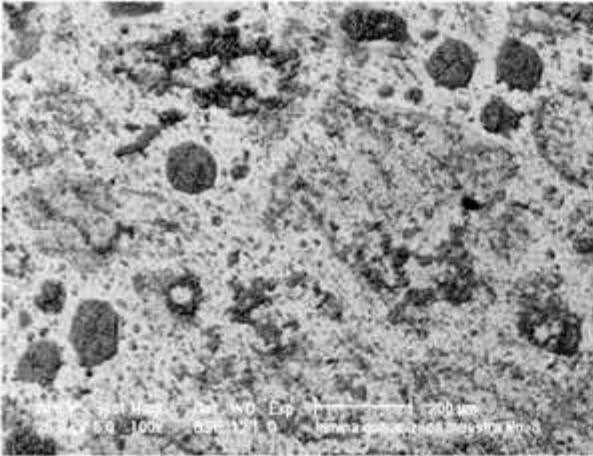


Figura 6.17 En las muestras de acero galvanizado se presentan diversos tipos de depósitos, desde los que son fundamentalmente óxidos de zinc, hasta sulfatos.



Figura 6.18 En general los depósitos son porosos y de baja adherencia.

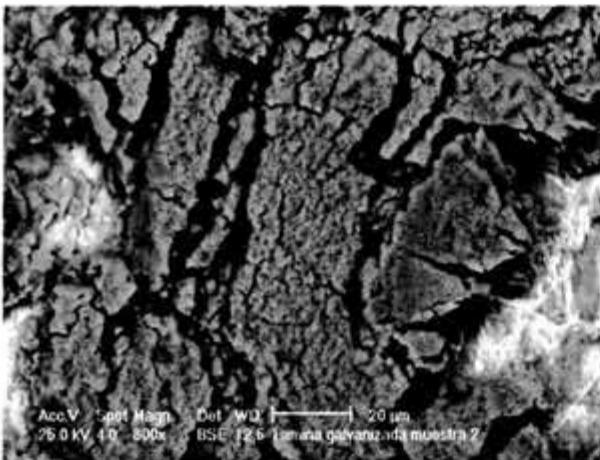


Figura 6.19 Detalle de la figura 6.18, se confirma la porosidad del depósito.



Figura 6.20 En algunas regiones se aprecian depósitos con una estructura definida, sin embargo por efectos de contraste se puede concluir que su composición es similar a la de la figura 6.19.

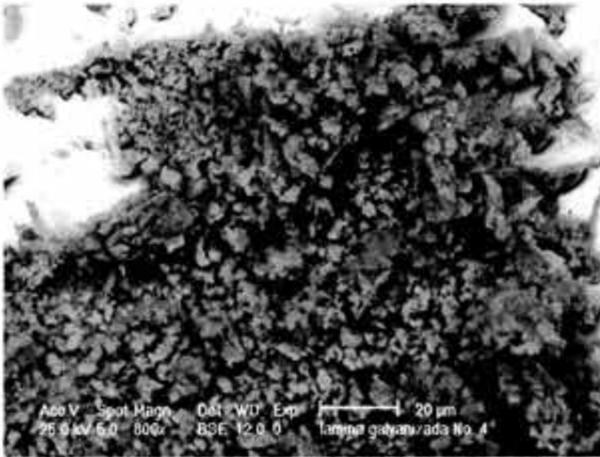


Figura 6.21. Detalle de los depósitos que más usualmente se presentan en la lámina galvanizada.

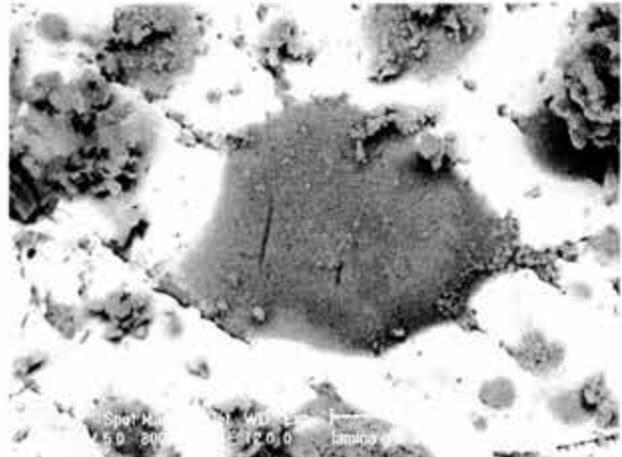


Figura 6.22. Los óxidos de zinc se identifican por su morfología.

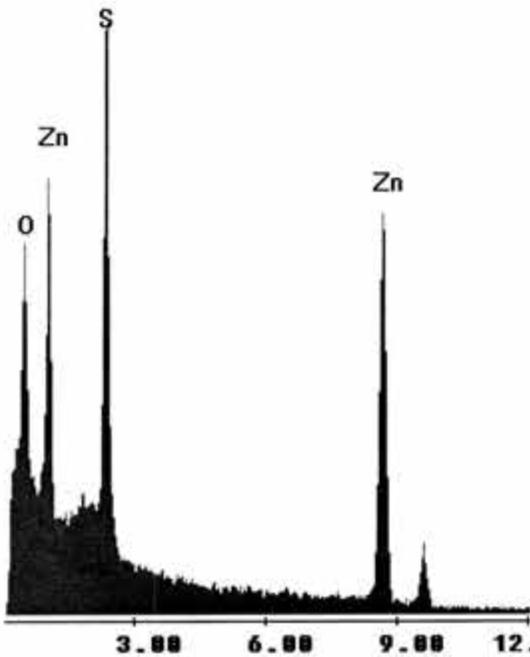


Figura 6.23. Espectro correspondiente a la figura 6.19

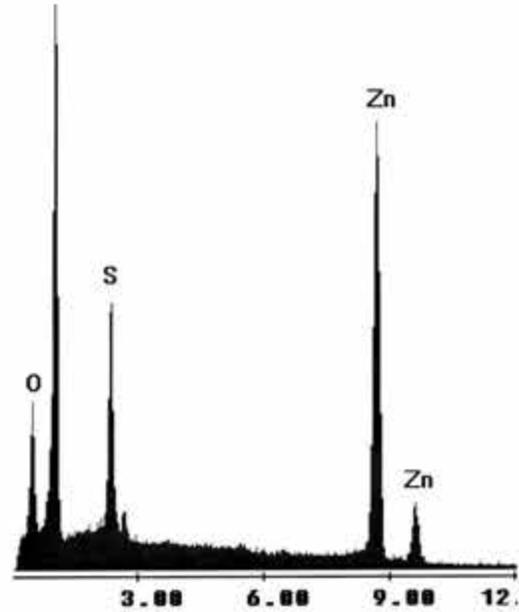


Figura 6.24. Espectro correspondiente a la figura 6.20

Tabla 6.5 Composición del depósito de la figura 6.19

Elemento	Wt %	At %
O K	29.41	57.83
S K	16.41	16.1
ZnK	54.18	26.07
Total	100	100

Tabla 6.6 Composición del depósito de la figura 6.20

Elemento	Wt %	At %
O K	15.91	40.77
S K	9.95	12.72
ZnK	74.14	46.51
Total	100	100

Muestras de lámina negra



Figura 6.25

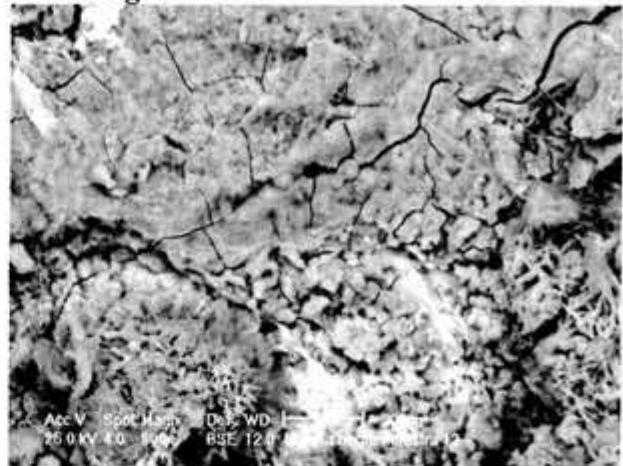


Figura 6.26



Figura 6.27

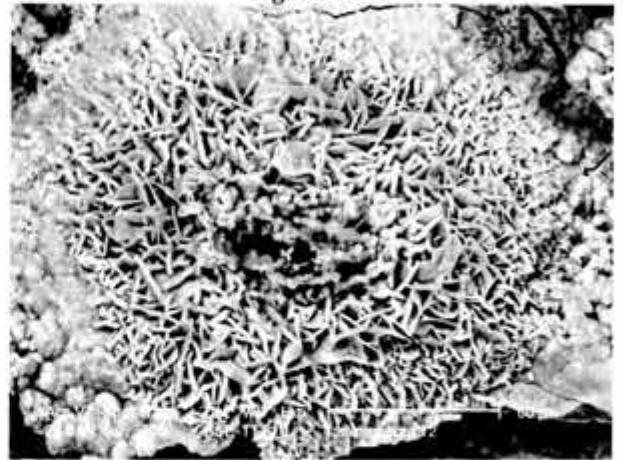


Figura 6.28

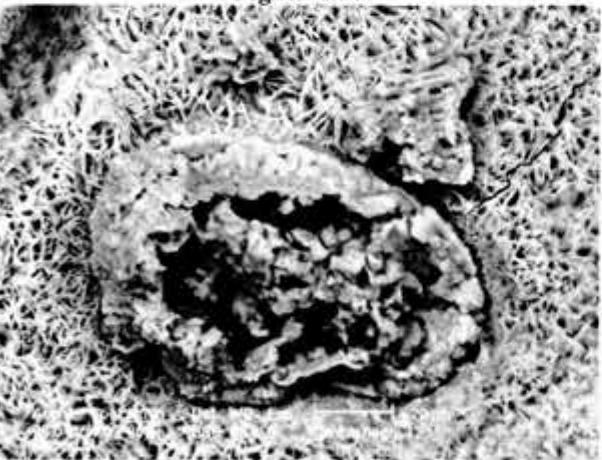


Figura 6.29

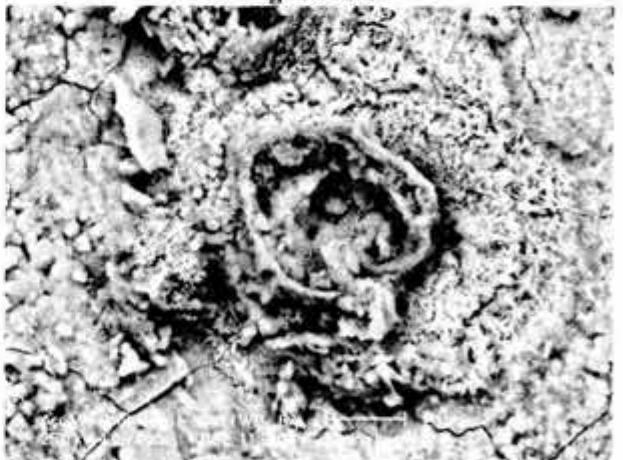


Figura 6.30

En las figuras 6.24 a la 6.30 se observan diferentes detalles de los depósitos formados, en la superficie de diversas muestras de lámina AISI 1008. El análisis de los depósitos indica, en todos los casos que se trata de óxidos o hidróxidos de hierro; con la presencia de compuestos de azufre. Las estructuras que se forman son porosas y en algunos de los casos presentan un crecimiento filiforme.

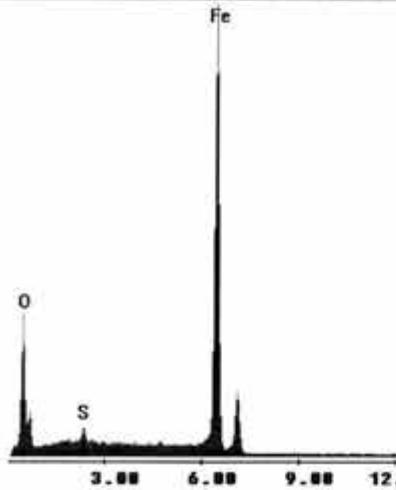


Figura 6.31. Espectro correspondiente a la figura 6.27

Tabla 6.7 Composición del depósito de la figura 6.27

Elemento	Wt %	At %
O K	17.94	43.05
S K	1.07	1.28
FeK	80.98	55.66
Total	100	100

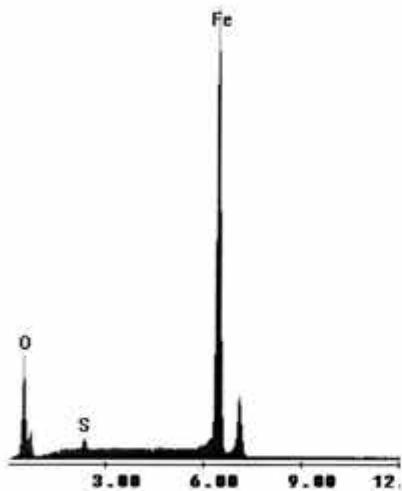


Figura 6.32. Espectro correspondiente a la figura 6.28

Tabla 6.8 Composición del depósito de la figura 6.28

Elemento	Wt %	At %
O K	14.17	36.4
S K	0.85	1.09
FeK	84.98	62.51
Total	100	100

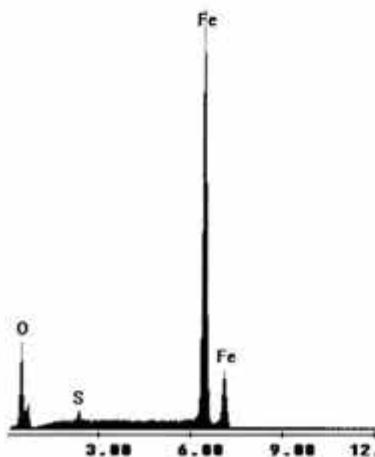


Figura 6.33. Espectro correspondiente a la figura 6.29

Tabla 6.9 Composición del depósito de la figura 6.29

Elemento	Wt %	At %
O K	13.43	34.94
S K	0.97	1.26
FeK	85.6	63.8
Total	100	100

6.3 EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA CÁMARA DE SIMULACIÓN ACELERADA DE CORROSIÓN EMPLEANDO TARJETAS ELECTRÓNICAS.

Realizada la prueba con probetas patrón, se procedió a la evaluación del sistema empleando para esto 4 aparatos telefónicos de tipo residencial Alcatel-Indetel® Modelo Digitel secret.ED.10 (figura 6.34) y Alcatel-Indetel® Modelo 2613D14 (figura 6.35). La prueba consistió de 240 ciclos (80 horas) en las condiciones establecidas para el ensayo (subcapítulo 5.3).

Una vez realizados los ensayos se procedió a la inspección de las tarjetas (figuras 6.36a, 6.36b y 6.37a, 6.37b) y a la elaboración de los mapas de condensación y deterioro (figuras 6.36c y 6.37c), todo esto de acuerdo con el protocolo previamente establecido.

Por último y de manera análoga a como se realizó con los equipos retirados de campo, se inspeccionaron primero a bajos aumentos y posteriormente con auxilio del microscopio electrónico y la microsonda aquellas zonas identificadas como críticas, esto es; pistas, interruptores, conectores, pilas para memoria y superficies con electrodepósito, lo anterior con la finalidad de comparar las características de los depósitos formados en forma acelerada con los que se presentan después de una prolongada exposición en campo.

De las observaciones relativas a las zonas de condensado se concluye que éstas son similares a las que se presentan en aparatos retirados de campo provenientes de regiones de elevada humedad, como es el caso Tampico o Coahuila. Sin embargo los análisis químicos indican un notable efecto de SO_2 , esto con excepción de la superficie estañada. Lo anterior permite considerar que se ha sobrepotenciado el efecto de dicho contaminante, razón por la que es necesario ajustar la concentración de éste en la atmósfera de trabajo para posteriores ensayos. Por otra parte resulta también evidente la ausencia de cloruros, los cuales fueron comúnmente encontrados en piezas provenientes de zonas costeras. De esto se desprende la conveniencia de trabajar con una solución salina en el humidificador del equipo, ya que los resultados en este punto analizados corresponden a un protocolo que considera el empleo de agua destilada.

El ensayo por otra parte permitió confirmar los elementos susceptibles de daño por corrosión, a la vez de poner en evidencia la mala calidad de varios de los recubrimientos empleados. En particular resultan evidentes los efectos nocivos que los recubrimientos de oro no continuos y uniformes (figuras 6.38 y 6.39) tienen en la formación de celdas galvánicas, así como en la producción de resistencias adicionales por contacto, producto éstas de los depósitos que rápidamente se forman en los pines y conectores recubiertos de dicho metal noble. Dadas las características de la atmósfera sintética empleada para el ensayo se verifica la susceptibilidad de los recubrimientos de níquel (figura 6.40) al estar en presencia de SO_2 , lo mismo que para los elementos recubiertos con zinc (figura 6.41) los cuales presentan un rápido deterioro. En el caso de la carcasa de la pila y su clip se presenta una celda galvánica cuyo efecto se limita al aplicarse la recomendación presentada en la figura 4.11b. Sin embargo, en este caso se observaron dos tipos de carcasas, aquellas producidas en acero inoxidable austenítico y las de acero al carbono cromadas. Estas últimas mostraron mucho más sensibilidad al ambiente (6.42b) ya que gran parte de la superficie resulta atacada, sobretodo aquella adyacente al clip. La piezas estañadas, como por ejemplo el clip (figura 6.43) se comportaron favorablemente, sin embargo en este punto habrá que considerar lo observado en elementos provenientes de regiones costeras donde el efecto

combinado de compuestos de azufre con los cloruros dan como resultado un fuerte deterioro de este tipo de superficies.

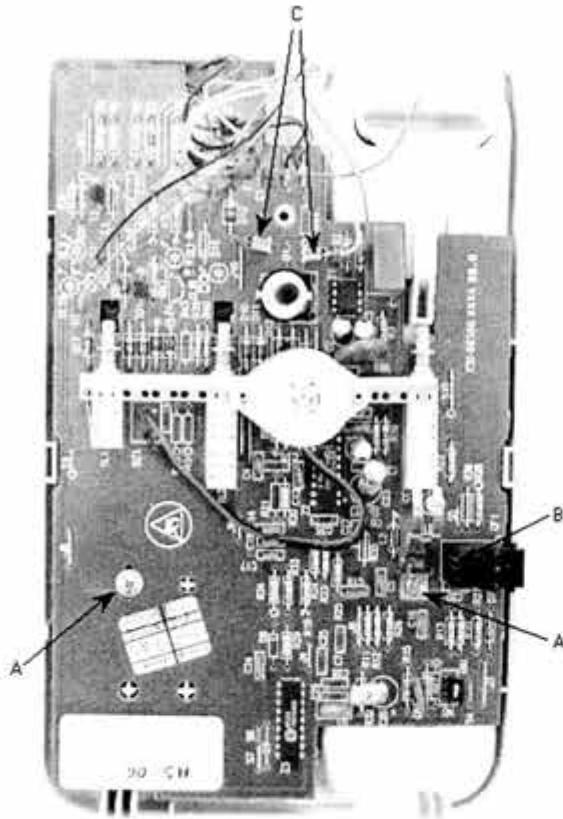


Figura 6.34 Tarjeta de teléfono modelo Digitel secret.ED.10. Se indican algunos elementos (A)-Tornillos, (B)-Conectores, (C)-Terminales.

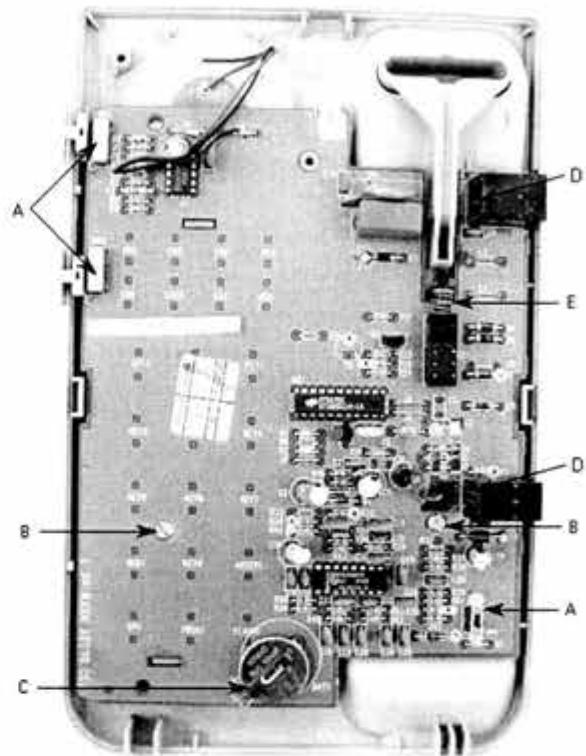


Figura 6.35. Tarjeta de teléfono modelo 2613D14. Antes de ser sometida al ensayo (A)-Interruptores, (B)-Tornillos, (C)-Lámina, (D)-Conectores, (E)-Resorte

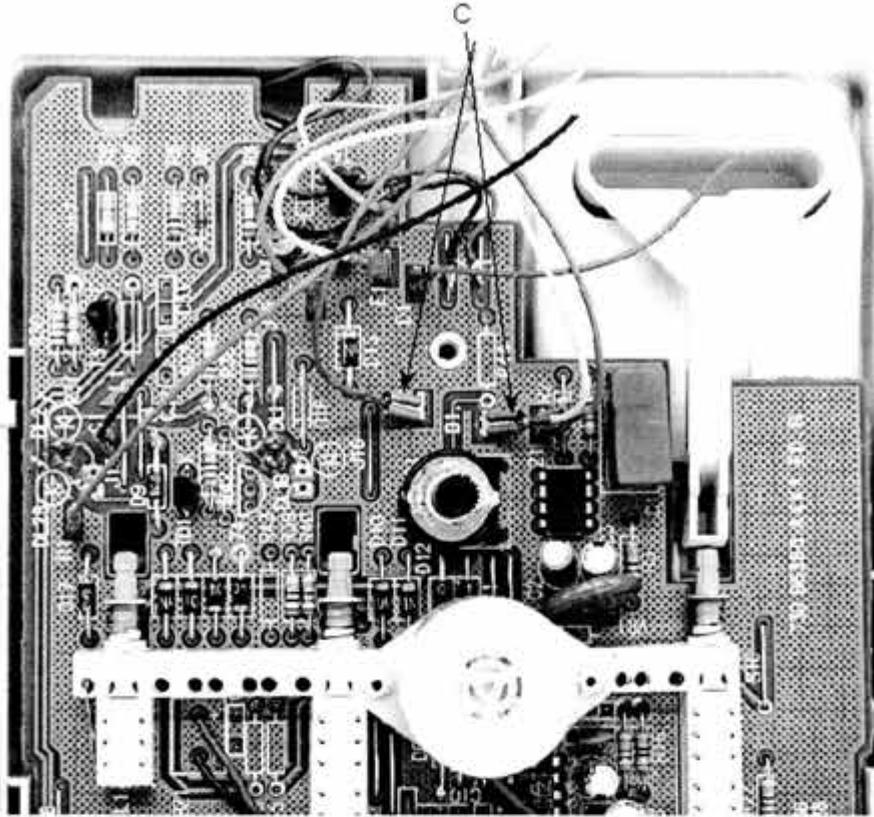


Figura 6.36a. Detalle de la región superior de la tarjeta Digitel secret.ED.10, esto después de ser sometida a 240 ciclos en la cámara de corrosión. En las terminales de los conectores (C) es más visible el deterioro

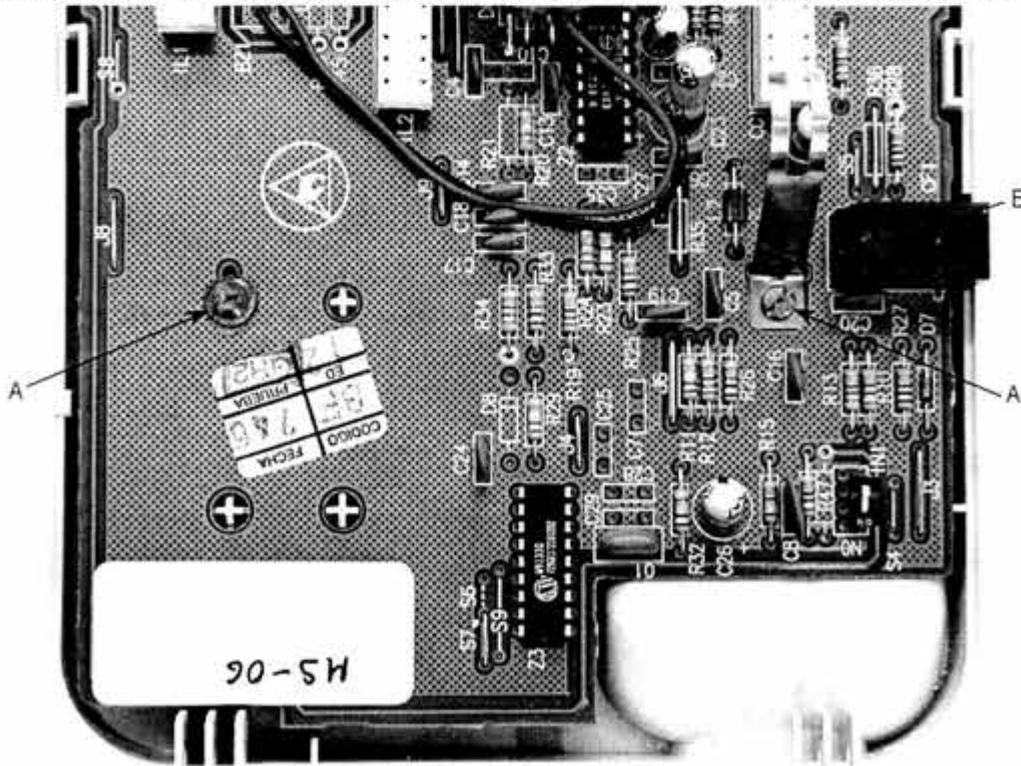


Figura 6.36b Región inferior de la tarjeta Digitel secret.ED.10. El daño más severo se observa en los tornillos (A) así como en el conector (B).

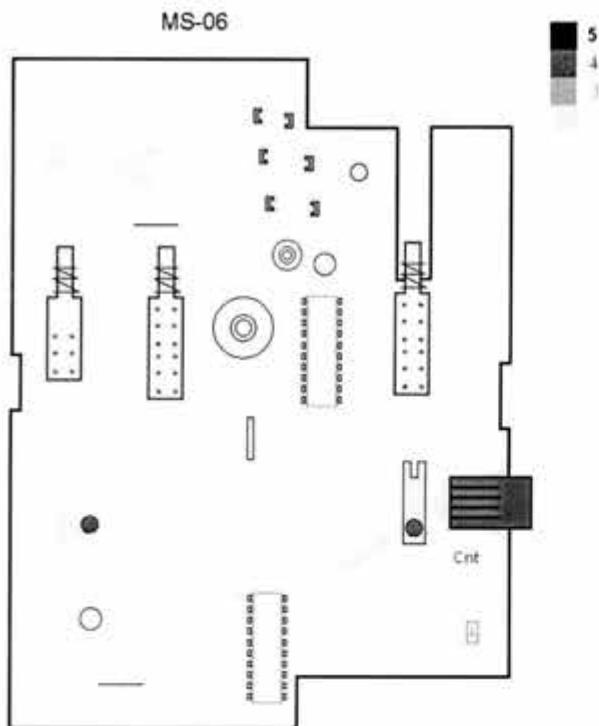


Figura 6.36c Diagrama de deterioro de tarjeta Digital secret.ED.10

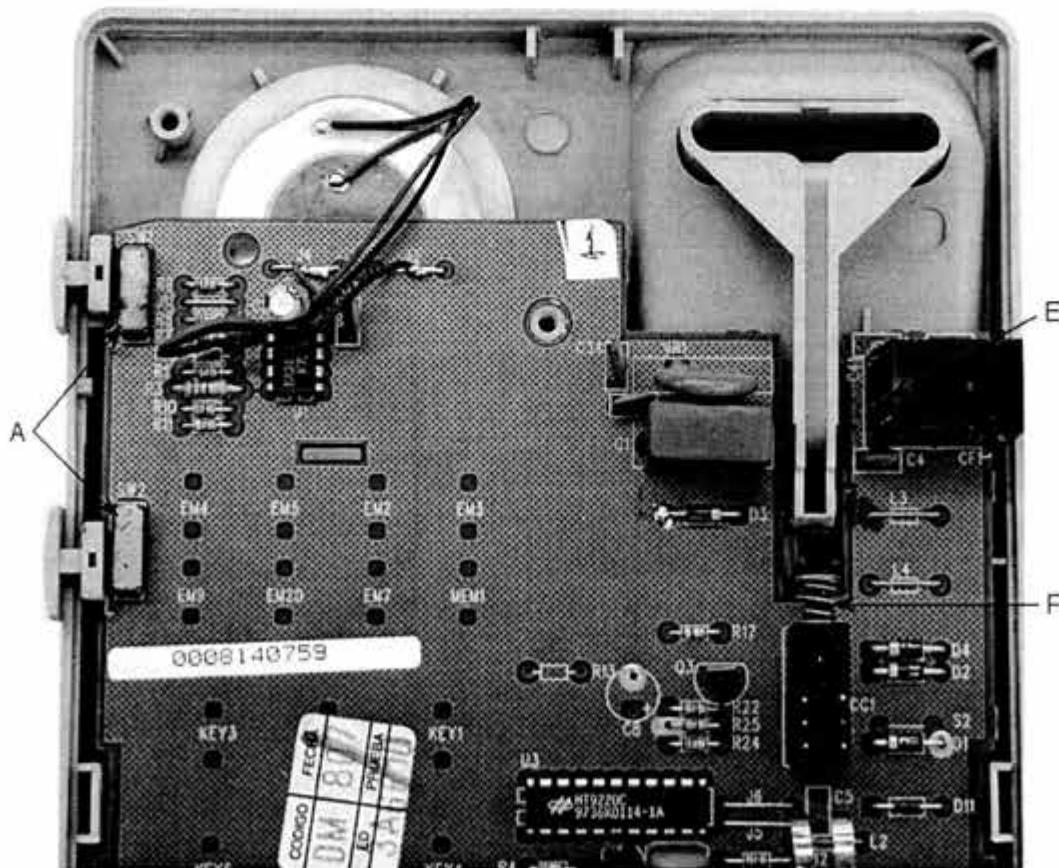


Figura 6.37a. Región superior de la tarjeta 2613D14 TN-1). El daño es visible en los interruptores (A), el resorte (F), así como en los conectores (E).

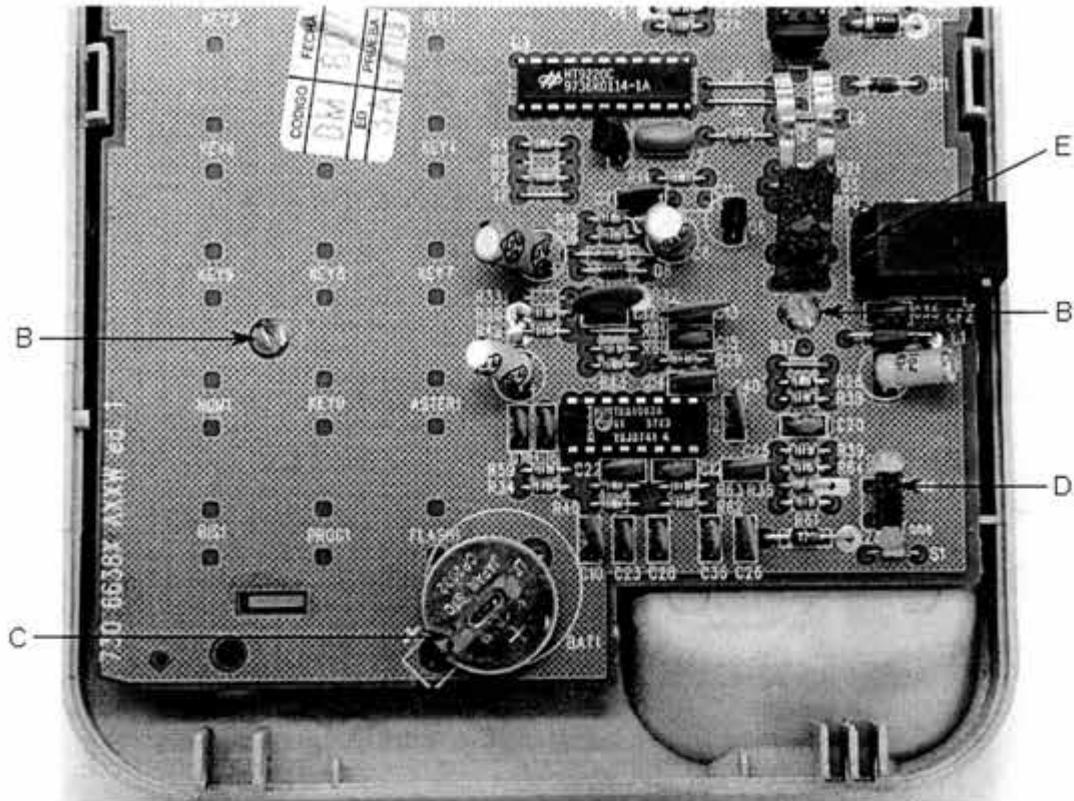


Figura 6.37b. Región inferior de la tarjeta 2613D14. El daño se aprecia a simple vista en los tornillos (B), en la lámina que sujeta a la pila (C) y en el interruptor (D).

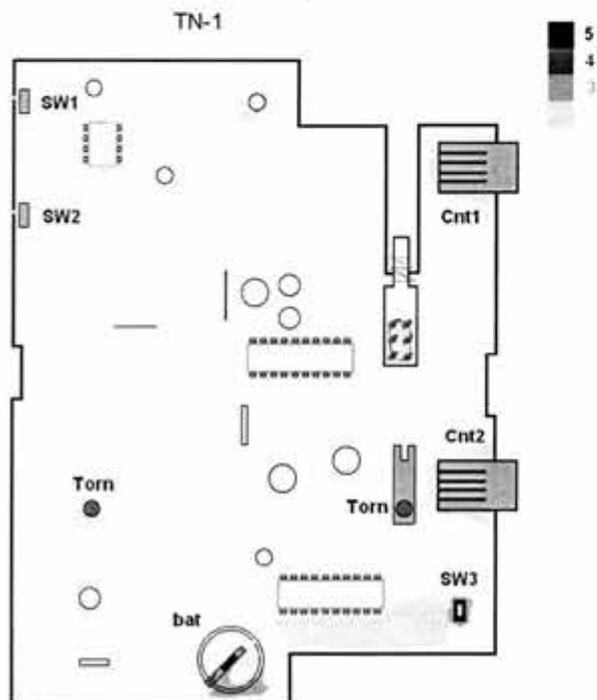


Figura 6.37c. Diagrama de deterioro de la tarjeta 2613D14

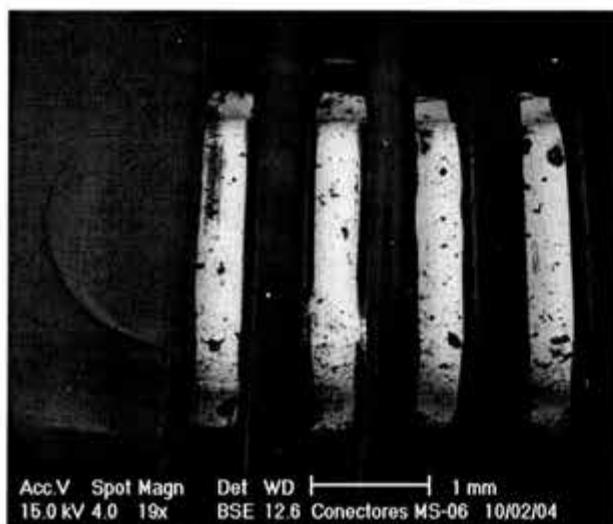


Figura 6.38a Pines de conexión del auricular del aparato telefónico. Se trata de piezas de cobre recubiertas con oro. Se observa la presencia de depósitos que afloran a la superficie

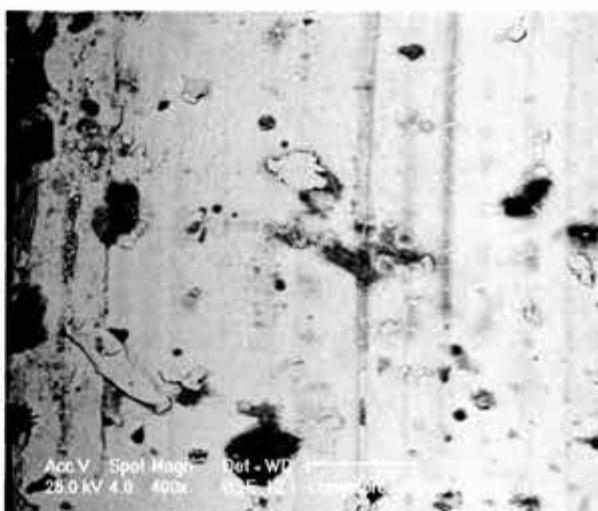


Fig 6.38b Detalle de la imagen 6.38a (400x). Los depósitos se presentan en las discontinuidades del recubrimiento de oro.

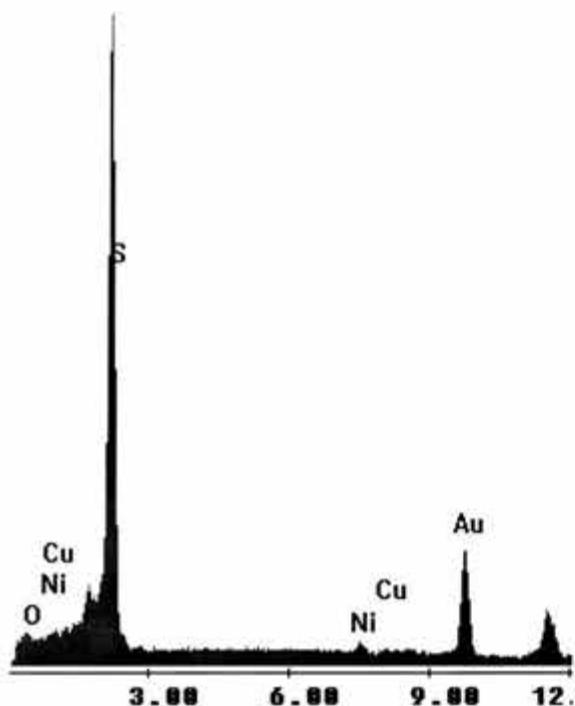


Figura 6.38c El espectro de EDS muestra que el recubrimiento de oro cuenta con una capa interior de níquel. En la table 6.10 se presenta el análisis cuantitativo correspondiente. Se trata de una zona general. Resulta evidente el efecto del SO_2 .

Tabla 6.10 Composición correspondiente a la figura 6.38b

Elemento	Wt %	At %
O K	1.72	10.83
S K	13.97	43.79
NiK	1.38	2.36
CuK	0.67	1.06
AuL	82.26	41.97
Total	100	100

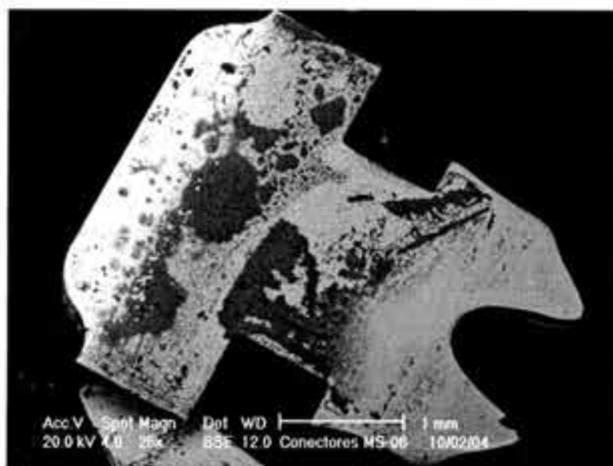


Figura 6.39a Conector de cobre con un recubrimiento de níquel y una sobre capa de muy bajo espesor de oro. Se aprecia una notable diferencia con relación a la calidad del recubrimiento de la figura 6.38a.

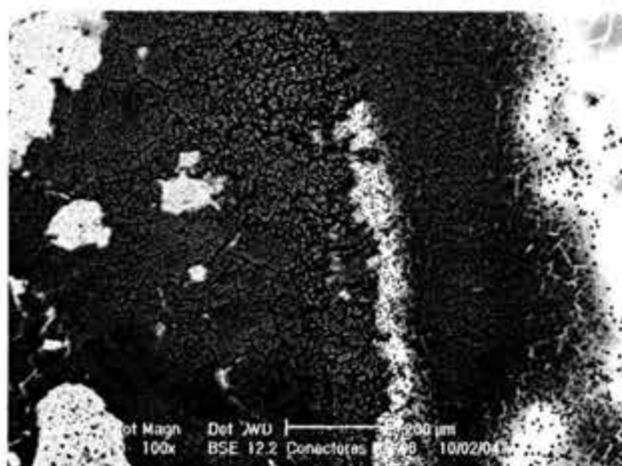


Figura 6.39b Detalle de la figura anterior. Por contraste y diferencias en la continuidad se aprecia la presencia de dos tipos de depósitos (zona izquierda y derecha). Cuya composición se constata es similar (zona izq. tabla 6.11, derecha tabla 6.12).

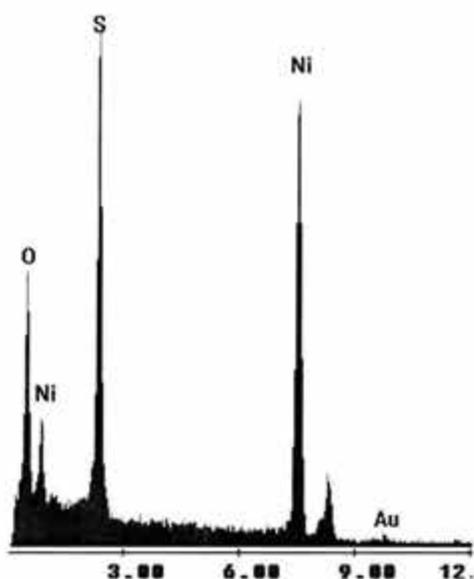


Figura 6.39c Espectro del depósito correspondiente a la región izquierda del depósito de la figura 6.39b.

Tabla 6.11 El depósito corresponde a aparentemente a sulfato de níquel.

Elemento	Wt %	At %
O K	27.06	53.31
S K	18.43	18.12
NiK	52.69	28.28
AuL	1.82	0.29
Total	100	100

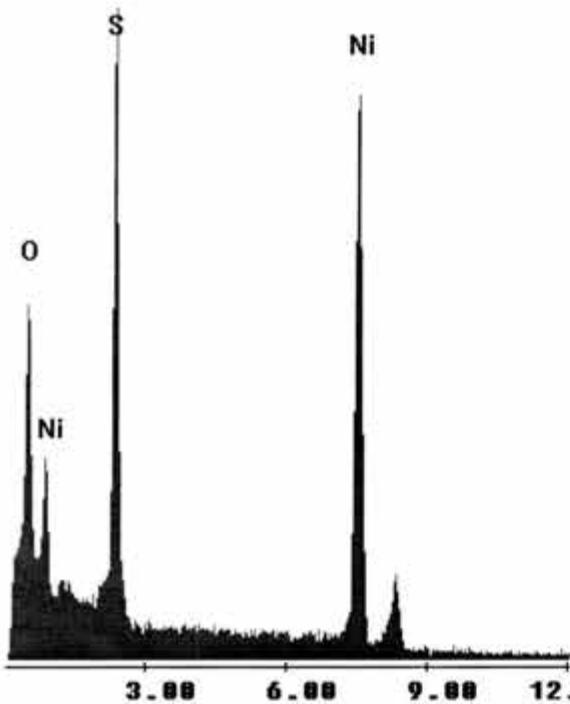


Figura 6.39d Espectro correspondiente al depósito de la zona derecha de la figura 6.39b

Tabla 6.12 La composición es muy similar a la presentada en la tabla 6.11, con excepción de la presencia de oro, por lo que se puede suponer corresponde a una región en donde el recubrimiento último fue prácticamente despreciable.

Elemento	Wt %	At %
O K	28.21	54.43
S K	17.89	17.23
NiK	53.9	28.34
Total	100	100

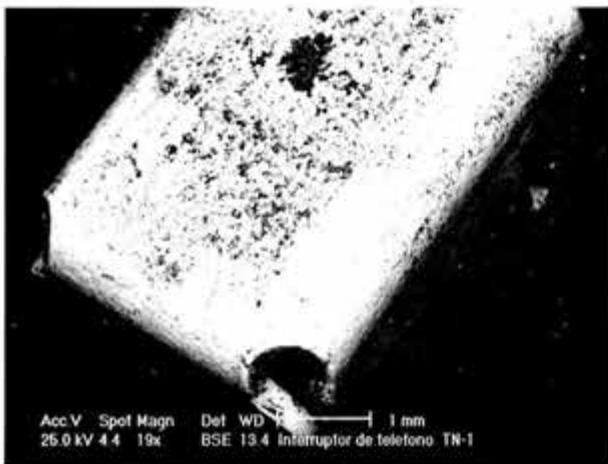


Figura 6.40a Carcaza de interruptor (19x). Se observa una importante presencia de depósitos. Se trata una lámina de acero de bajo carbono niquelada, esto de acuerdo al espectro 6.40c.

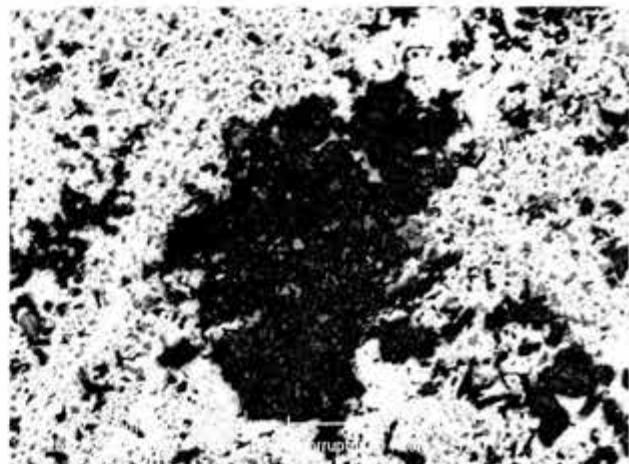


Figura 6.40b Detalle de los depósitos que se forman en la carcaza del interruptor (100x). Se trata fundamentalmente de sulfatos con algunas partículas de SiO₂ atrapadas (esto de acuerdo al espectro de la figura 6.40d).

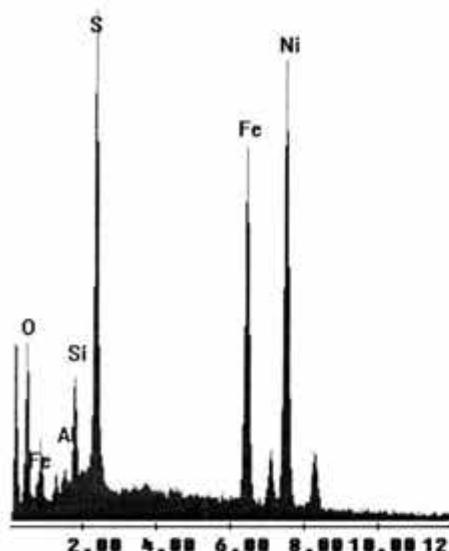


Figura 6.40c Espectro correspondiente a una zona con baja presencia de depósitos. De acuerdo con el análisis cuantitativo (tabla 6.13) se concluye que se trata de un depósito de níquel sobre una superficie de acero.

Tabla 6.13 Análisis cuantitativo correspondiente al espectro de la figura 6.40c

Elemento	Wt %	At %
O K	0.22	0.81
S K	0.49	0.89
FeK	7.13	7.4
NiK	92.15	90.91
Total	100	100

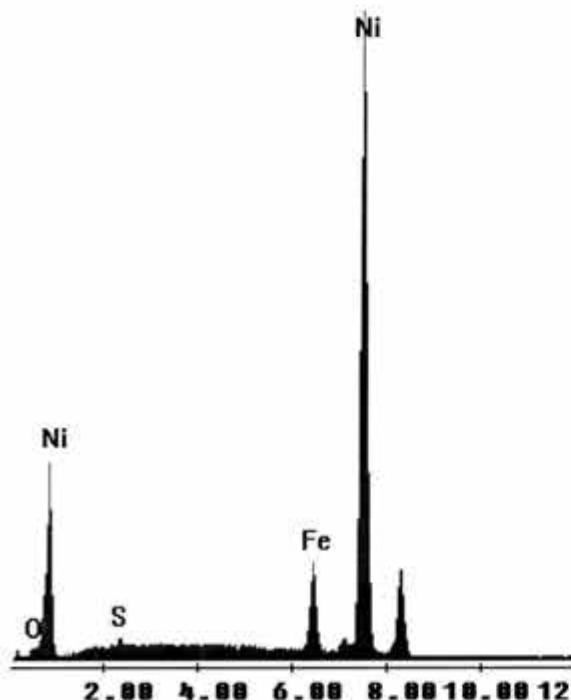


Figura 6.40d Espectro correspondiente al depósito de la figura 6.40b.

Tabla 6.14 Resultados del análisis cuantitativo del depósito formado en la superficie niquelada del interruptor. Es evidente la importancia de la presencia del dióxido de azufre en el ataque.

Elemento	Wt %	At %
O K	13.25	31.17
AlK	1.47	2.05
SiK	4.8	6.43
S K	15.07	17.69
FeK	22.32	15.04
NiK	43.09	27.62
Total	100	100

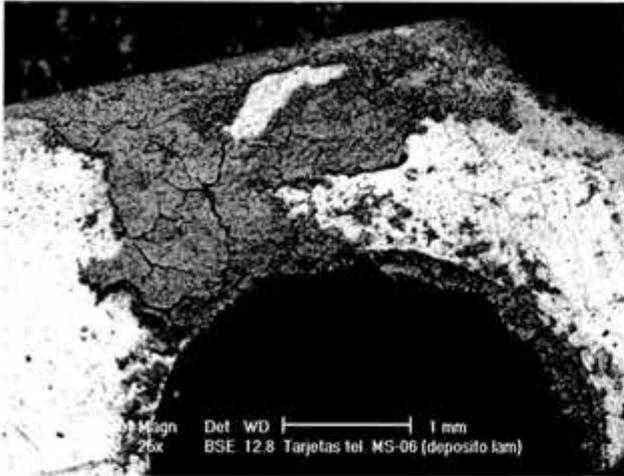


Figura 6.41a Es evidente la intensidad del deterioro que sufren las piezas de acero galvanizadas. En este caso también se demuestra el efecto que el SO_2 tiene en el ataque.

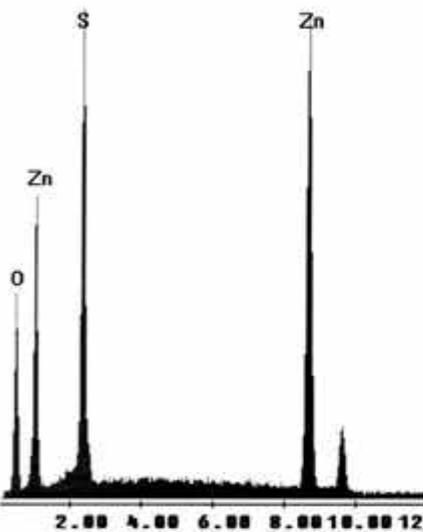


Figura 6.41b Espectro correspondiente a los depósitos que se forman en la superficie galvanizada.

Tabla 6.15 Se constata del análisis cuantitativo que los depósitos son fundamentalmente sulfatos.

Elemento	Wt %	At %
O K	18.25	43.13
S K	15.95	18.8
ZnK	65.8	38.06
Total	100	100

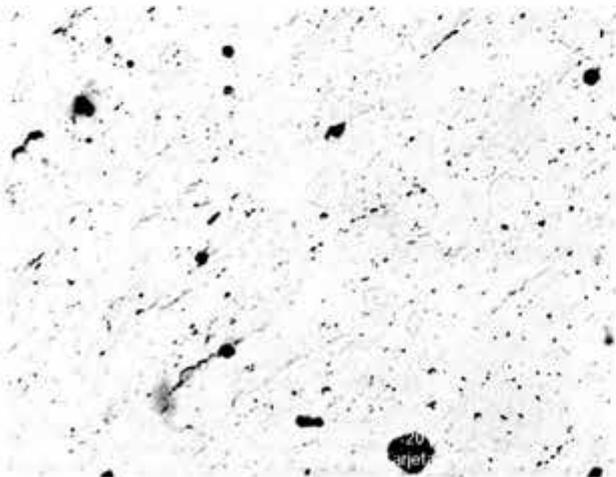


Figura 6.42a Aspecto superficial de la carcasa de la pila de memoria del teléfono. Se trata de una lámina de acero cromada.

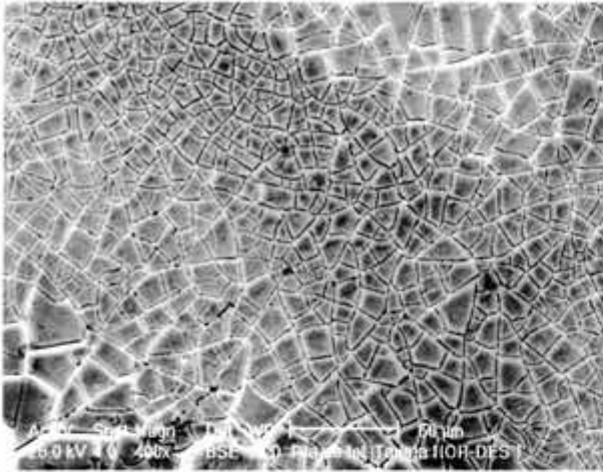


Figura 6.42b En la carcasa de la pila se forman una serie de depósitos, los cuales son discontinuos, y de acuerdo a su análisis (tabla 6.17) son fundamentalmente compuestos de níquel.

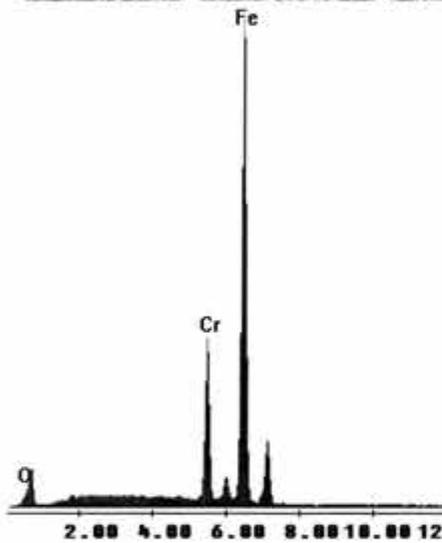


Figura 6.42c Espectro correspondiente a la superficie de la carcasa de la pila (figura 6.42a).

Tabla 6.16 Resultados del espectro de la figura 6.42c.

Elemento	Wt %	At %
O K	2.06	6.72
SiK	0.46	0.86
S K	0.13	0.21
CrK	15.58	15.67
FeK	81.77	76.54
Total	100	100

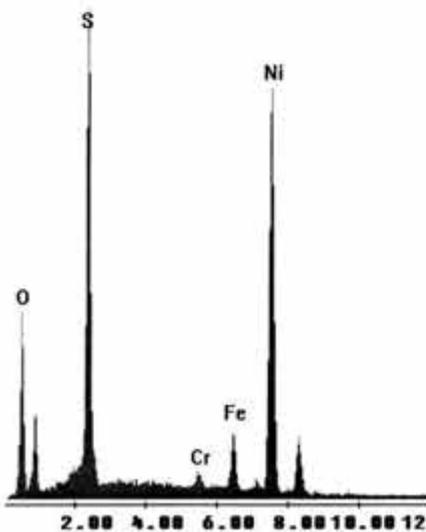


Figura 6.42 d Espectro correspondiente a los depósitos que se forman en la carcasa de la pila para memoria.

Tabla 6.17 De acuerdo al análisis cuantitativo los depósitos que se forman (figura 6.42b) son fundamentalmente sulfatos de níquel.

Elemento	Wt %	At %
O K	20.93	44.45
S K	19.94	21.13
CrK	0.88	0.58
FeK	4.57	2.78
NiK	53.68	31.07
Total	100	100

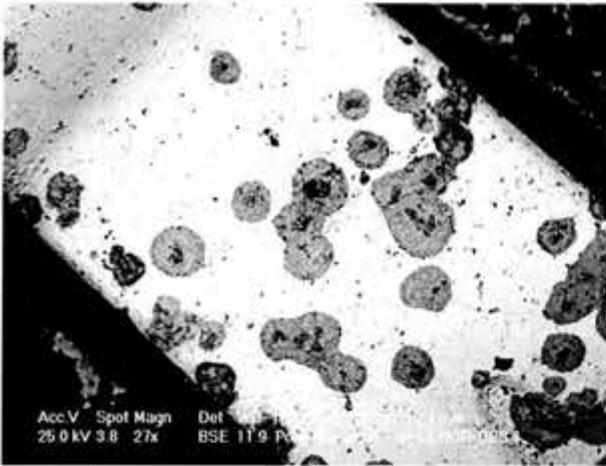


Figura 6.43a Imagen a bajos aumentos (27x) del clip de la pila. Se trata de una lámina de acero estañada (espectro 6.43c y tabla 6.18).

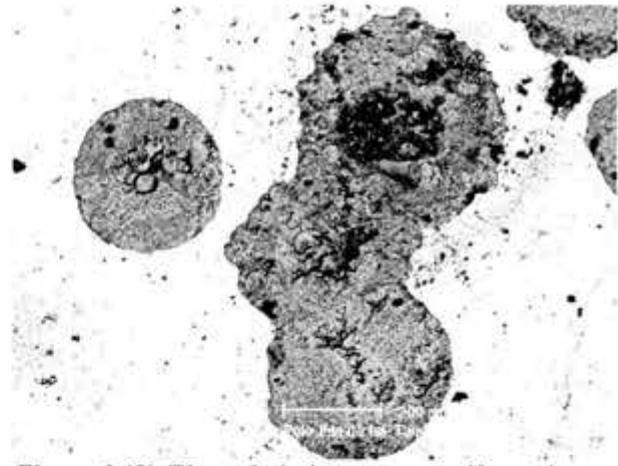


Figura 6.43b El recubrimiento no es uniforme lo que da lugar a la presencia de celdas galvánicas con un efecto de área muy desfavorable.

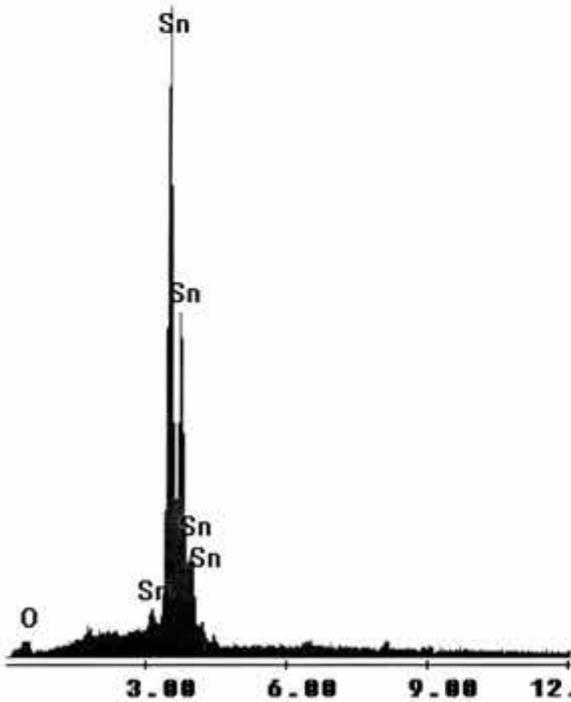


Figura 6.43c Espectro correspondiente a la superficie del clip de sujeción de la pila de memoria (figura 6.43a).

Tabla 6.18 Se comprueba que la superficie del clip ha sido estañada, esto con la intención de mejorar su resistencia a la corrosión.

Elemento	Wt %	At %
O K	4.48	25.81
SnL	95.52	74.19
Total	100	100

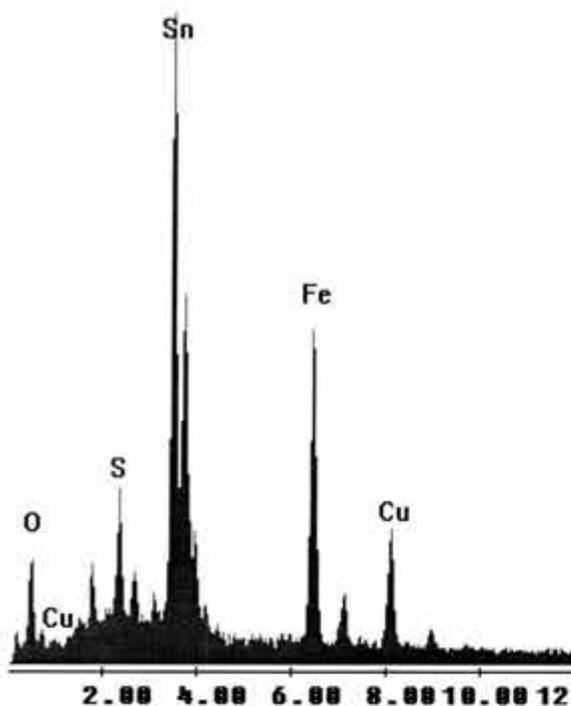


Figura 6.43d Espectro correspondiente a los depósitos de la figura 6.43b.

Tabla 6.19. A través de las discontinuidades del recubrimiento se presenta la formación de celdas galvánicas en las que el estaño de la superficie actúa como cátodo, mientras que el cobre (recubrimiento intermedio) y el propio hierro (se trata de una lámina de acero de bajo carbono estañada) actúan en forma anódica.

Elemento	Wt %	At %
O K	14.27	44.87
S K	3.37	5.29
SnL	48.2	20.42
FeK	21.86	19.69
CuK	12.29	9.73
Total	100	100

6.4 CONCLUSIONES

En general los ensayos realizados han permitido constatar las bondades y limitaciones de la metodología propuesta. Resulta por demás predecible que la presencia de SO₂ combinado con ciclos de condensación- evaporación dará lugar a un rápido deterioro de diversos componentes presentes en las tarjetas electrónicas. Lo interesante de la validación realizada se presenta a través de la confirmación de la capacidad de acelerar el daño a través de la metodología y sistema propuesto.

En cuanto a las limitaciones del sistema parte de éstas ya habían sido previstas al considerar que éste solo tendrá la capacidad de realizar simulaciones aceleradas de tipo cualitativo, esto en virtud la compleja interacción existente entre el ambiente y las particularidades de los sistemas expuestos. Sin embargo, solo la simulación cualitativa es en si mucho más precisa que cualquier análisis y predicción, resultante de la exposición de cupones de cobre o de cualquier otro metal o aleación. Se debe recordar asimismo que este tipo de exposiciones son solo un mecanismo de evaluación de la agresividad del medio en particular.

Otra limitación del sistema se generó a partir de las consideraciones de muchos de los sistemas propuestos para la evaluación del deterioro por corrosión en sistemas electrónicos, ya que la mayoría de los autores y procedimientos propuestos con éste fin [10,11,12,13] consideran la

presencia de gases como SO₂, H₂S, situación que en mucho orientó la decisión en cuanto a los contaminantes a emplear en los ensayos preliminares. Por otra parte existen algunos ensayos del tipo de flujo de mezcla de gases [76,77] que adicional a la propuesta anterior también consideran el empleo de NO₂ y cloro.

Si bien, como fue comentado, existe similitud en los depósitos formados por la exposición en campo con los generados a través del ensayo acelerado, la excepción está dada en cuanto a la composición de algunos de éstos, ya que en los ensayos acelerados básicamente se determinó la existencia de compuestos de azufre, a diferencia de los depósitos formados por exposición en algunas localidades (zonas costeras y Cocoyoc), en donde la presencia de cloruros fue importante sobre todo en las piezas de acero inoxidable y latón. Otro de los inconvenientes de la metodología propuesta lo representa la imposibilidad de simular o predecir los efectos relacionados con la presencia de partículas depositadas en las superficies. De aquí se puede concluir en la conveniencia de garantizar la presencia de cloro de tal forma que se tenga una mayor congruencia entre los depósitos generados por la exposición en campo con los producidos durante el ensayo acelerado. Queda pendiente entonces la metodología a seguir para garantizar la presencia de cloro, ya que mientras las pruebas de mezcla de gases manejan éste a partir de su forma gaseosa, donde una posible alternativa es la de emplear una solución salina de tal forma que el condensado que se forme presente Cl⁻ en solución.

En cuanto a las bondades del sistema estas se orientan con dirección a las similitudes encontradas entre el deterioro en campo y el generado en forma acelerada en la cámara, situación que no necesariamente se presenta en las pruebas estandarizadas. Por otra parte habrá que considerar que no existe homogeneidad en las pruebas empleadas para la evaluación de deterioro por corrosión en equipo electrónico ya que mientras algún autor considera [85] la aplicación de pruebas de cámara de niebla salina (la cual ya se ha comentado que no tiene relación alguna con las condiciones de falla) otras se orientan a la evaluación bajo un solo contaminante de acuerdo a lo propuesto por [10,11,12,13], mientras que la tendencia en los últimos 15 años ha sido la aplicación de pruebas con mezclas de gases [76,77]. De cualquier forma estas propuestas, aún cuando se han transformado en normas, adolecen de inconvenientes en cuanto a la representatividad de las condiciones reales de falla, por lo que su empleo está enfocado a la evaluación comparativa de sistemas y métodos de protección. En este punto es donde se vuelve evidente la principal ventaja del método propuesto, ya que este representa condiciones que favorecen la presencia de fenómenos similares a los generados durante la exposición en campo, con la ventaja de la aceleración del deterioro.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1 DISCUSIÓN

La importancia presente y futura que el equipo y los dispositivos electrónicos tienen es innegable, desde el punto de vista de su creciente presencia en todos los ámbitos de la vida y del valor que éstos representan [4]. Por otra parte, si bien, en muchos casos no se le ha dado la debida importancia a las fallas que estos equipos pueden presentar por corrosión, se reconoce desde mediados de la década de 1960 la necesidad de evaluar el deterioro de los sistemas electrónicos por efecto de los contaminantes presentes en la atmósfera. De éstas inquietudes surgieron los primeros métodos de evaluación a raíz, primero, del interés de los propios fabricantes, para posteriormente traducirse en normas [10,11,69,76,77], las cuales en general permiten un análisis comparativo del comportamiento, y por consecuencia generan información orientada a aspectos de diseño y procedimientos de protección.

De acuerdo a la dinámica del sector no es factible realizar pruebas de campo para evaluar el comportamiento de los sistemas, sin embargo la aplicación de la metodología de análisis de falla en la determinación las causas fundamentales de los problemas observados en campo permiten, sin lugar a dudas, el desarrollo de mejoras en los diseños, ya que a final de cuentas el sector de la manufactura de dispositivos y sistemas electrónicos requiere producir más con un menor costo y con mayor confiabilidad.

Como consecuencia de lo antes expuesto se desprende la necesidad del sector en cuanto a métodos de prueba que simulen en forma acelerada los fenómenos que se presentan en servicio. Ahora bien, la problemática de cualquier ensayo propuesto se relaciona con la propia orientación de éstos, ya que para el caso de la industria electrónica normalmente se pretende la evaluación de sistemas complejos, por lo que la interacción entre los diversos elementos que constituyen el dispositivo, y entre éstos y los contaminantes presentes dan como consecuencia la imposibilidad de que los resultados obtenidos sean cuantitativos, y por consecuencia que los datos obtenidos se puedan extrapolar para determinar la probable vida en servicio del sistema.

Queda entonces pendiente la necesidad de desarrollar una metodología que permita la evaluación acelerada, de tipo cualitativo, para determinar inconvenientes en el diseño y los puntos o dispositivos críticos en el sistema.

Los fenómenos corrosivos que se suscitan en equipo y dispositivos electrónicos son los mismos que en lo general se presentan. Sin embargo, en este tipo de dispositivos se tiene el agravante de las dimensiones de los elementos involucrados, por lo que las condiciones críticas de pérdida de masa (pueden ser desde fracciones de gramo hasta de 10^{-9} g.), asimismo habrá que considerar la presencia de celdas galvánicas y los intensos gradientes de potencial que pueden estar involucrados durante la operación del sistema. Todo esto da lugar a fenómenos como; disolución anódica y catódica, crecimiento dendrítico, formación de depósitos en superficies de contacto, corrosión galvánica, fluencia de productos de corrosión a través de la porosidad de los recubrimientos, entre otros. Estos fenómenos dan lugar a interrupción en la continuidad, incremento en la resistividad, cortocircuito entre hilos conductores, pérdida de información en dispositivos de almacenamiento magnético de datos, todo lo cual afecta el funcionamiento y confiabilidad de los equipos. Considerando la susceptibilidad al daño por medio ambiente en

dispositivos electrónicos se tiene que los elementos críticos son; conectores, interruptores y los microcircuitos, con la salvedad de una más compleja problemática en éstos últimos.

Resulta necesario considerar también que las investigaciones realizadas a la fecha con relación al deterioro, por medio ambiente, en dispositivos electrónicos se han orientado a las condiciones que prevalecen en las naciones desarrolladas, cuyas condiciones no corresponden a las características de exposición existente en economías emergentes y en general en Latinoamérica, razón por la cual es necesario considerar la adecuación de los resultados obtenidos y de los propios diseños. Dentro de esta línea se han venido desarrollando proyectos como el denominado *Tropicorr* [87], en el cual participan instituciones de investigación de 8 países de Iberoamérica. En esta misma dirección se puede considerar el proyecto que con el presente trabajo se ha iniciado en la UNAM, ya que este ha permitido definir condiciones críticas de exposición para diversas regiones de México, a la vez de concluir que la humedad relativa, y por consecuencia el tiempo de humectación son las variables fundamentales en el deterioro de los dispositivos electrónicos.

Por otra parte se requiere de metodologías que agilicen el envejecimiento, para mejorar así la confiabilidad de los dispositivos expuestos a las condiciones características de México y Latinoamérica, situación que redundará en el desarrollo de equipo con una mejor relación beneficio-costos. Dentro de este aspecto el presente proyecto también ha aportado una solución concreta cuyos resultados se han presentado a lo largo del capítulo 6. Es conveniente mencionar la similitud entre los resultados obtenidos a través del envejecimiento acelerado y los observados en las muestras provenientes de campo. La metodología de evaluación de deterioro de equipo proveniente de servicio ha permitido determinar, en los dispositivos y equipo electrónico:

- a. Problemas básicos
- b. Elementos críticos
- c. Contaminantes principales y condiciones críticas, para las características de exposición típicas de México
- d. Comprobar inconvenientes producto de recubrimientos, los cuales ya han sido reportados en la literatura.

Es conveniente precisar que si bien el método planteado no brinda información con relación a la naturaleza exacta de los mecanismos involucrados en el deterioro por corrosión de equipo y dispositivos electrónicos instalados bajo diferentes condiciones climáticas y de contaminantes presentes en diferentes regiones de la República Mexicana, éstos análisis representan una primera aproximación en cuanto a la problemática del equipo electrónico para las condiciones típicas de exposición contaminantes y clima características de México. Lo anterior en virtud de que todo lo reportado a la fecha se refiere a estudios realizados para condiciones climáticas y de control ambiental para regiones por arriba del paralelo 30 de latitud norte.

Si bien, el enfoque experimental seguido en el presente estudio está fuera de los procedimientos establecidos, éste ha permitido la determinación de los principales factores involucrados en la corrosión de los equipos electrónicos bajo las condiciones climáticas analizadas, Es por consecuencia necesario mencionar que a la fecha no existen pruebas estándar que hayan podido llegar a los mismos resultados.

7.2 COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El procedimiento propuesto para verificar el efecto del medio ambiente en el equipo y dispositivos electrónicos cumplió con las expectativas, ya que la metodología de evaluación es rápida y razonablemente precisa, permitió asimismo definir a las variables críticas (humedad relativa), así como a los contaminantes críticos (SO_2 , Cl⁻), para las condiciones características de exposición en México. También en lo que se refiere a la humedad relativa existen muy diversos puntos de vista en cuanto a sus condiciones críticas, ya que mientras algunos autores [20] consideran que puede existir una capa acuosa desde valores de la humedad relativa (HR) del orden de 20 %, otros para esta variable un valor crítico del 60% [88], los resultados obtenidos de la inspección de los dispositivos llevan a concluir que el rango de 80% de HR considerado para definir los tiempos de humectación según ISO [30] es un valor razonable.

En este punto se es necesario enfatizar que el grado de contaminación ambiental no representa una característica fundamental en la corrosión de dispositivos electrónicos, ya que en particular en los equipos que estuvieron en servicio en la ciudad de México no se encontraron mayores evidencias de un deterioro significativo de ningún elemento. Por último la inspección generó valiosa información en cuanto a los inconvenientes de diseño (recubrimientos de oro, generación de pares galvánicos, etc), además de permitir precisar los componentes críticos (interruptores, conectores, microcircuitos).

En cuanto a la metodología de aceleración del daño por medio ambiente propuesta en este trabajo se comprobó la similitud de los resultados obtenidos con el deterioro observado luego de la exposición en campo.

Si bien en la literatura se describen algunos métodos que pueden considerarse similares, se cumple en la metodología propuesta la conveniencia de emplear ciclos de temperatura para de esta forma simular de manera más aproximada las condiciones presentadas en campo [86]. Es por tanto ésta una de las virtudes principales del ensayo propuesto.

Las características del equipo diseñado para cumplir con las condiciones de prueba inicialmente establecidas permiten el adecuado control de las variables principales como son la humedad, temperatura y concentración de contaminantes. La ventaja del sistema de control se constata a través de la facilidad con la cual se pueden modificar las condiciones de ensayo. El sistema es por consecuencia versátil y fácil de operar, además de permitir el funcionamiento automático una vez que se han definido las variables de operación.

Por lo tanto como logros del proyecto destacan:

- i. Desarrollo de la metodología para la evaluación del daño sufrido en tarjetas electrónicas, por efecto de medio ambiente
- ii. Determinación de las variables, que para las condiciones características críticas encontradas en México, se presentan
- iii. Desarrollo de una metodología que permite la simulación acelerada del daño que se presenta en campo

- iv. Diseño y puesta a punto del equipo de prueba requerido para llevar a efecto la simulación propuesta. Cabe además la posibilidad de emplear el equipo en otros procedimientos de evaluación acelerada de daño por corrosión atmosférica
- v. Desarrollo de una línea de investigación novedosa en la UNAM

Por último es importante reiterar que todo lo reportado a la fecha se refiere a condiciones características de países desarrollados en donde la concentración de contaminantes y la humedad son mucho menos críticas que las encontradas en México. En este punto es conveniente recordar que los diseños se realizan bajo dichas expectativas, situación que se traduce en una mayor frecuencia de falla bajo las condiciones climáticas típicas de México y de Latinoamérica. Esta situación en muchos casos es inadvertida al no reconocerse la importancia que la corrosión tiene en el deterioro del equipo electrónico.

7.3 RECOMENDACIONES

Es evidente que el proyecto representa apenas un primer paso en el campo, además todo lo realizado a la fecha tiene una vertiente cualitativa, por lo que ahora el reto lo representa pasar a aspectos cuantitativos que permitan, dentro de las limitantes existentes, disponer de una referencia en cuanto a la rapidez de deterioro y por consecuencia de la vida de servicio.

El origen del proyecto se relaciona con la necesidad específica de una empresa del ramo, orientada a la manufactura de equipo telefónico, en cuanto a la prospectiva de los problemas presentados por sus equipos ya en servicio, así como a la conveniencia de disponer de métodos más precisos, que el de cámara de niebla salina empleado hasta la fecha, para evaluar la confiabilidad de sus diseños.

Lo anterior ha sido cubierto satisfactoriamente, sin embargo se han abierto nuevos retos, sobretudo en lo que se refiere al estudio del deterioro por medio ambiente de microcircuitos, así como de dispositivos de almacenamiento magnético de datos. Es en este último punto donde ya se están dando los primeros pasos para determinar la frecuencia y características del deterioro por medio ambiente, situación que se traducirá en recomendaciones en cuanto a la mejora de los sistemas orientados al mercado de las regiones tropicales y subtropicales.

Como resultado de todo lo anterior se podrá disponer de mejores diseños, producidos éstos a menor costo, con la consecuente satisfacción del usuario, a la vez de mejorar las expectativas de confiabilidad y duración de los sistemas electrónicos.

Por último no queda más que concluir que para analizar problemas que por corrosión se presenten en los equipos y dispositivos electrónicos es más fácil enseñar electrónica a un ingeniero en corrosión que a un electrónico capacitarlo en la Ciencia e Ingeniería de la corrosión.

REFERENCIAS

1. Cerrud, S., Ortiz, A., Jacobo, V., Schouwenaars, R. Design, Construction and Testing of a System for Accelerated Simulation of Damage by Atmospheric Corrosion on Electronic Equipment. Corrosion Reviews. Corrosion Reviews. Vol 21, 2003
2. Mariaca, R.L., Genesca, J., Uruchurtu, Ch., J. Corrosividad Atmosférica, Plaza y Valdez Editores- UNAM, 1999
3. Gold, G. Five Years of Research in Atmospheric Corrosion. British Corrosion Journal Vol 25, 1990
4. Yukonovich. Electronics. CC technologies laboratories, Inc. Dublin Ohio, 2001
5. Ortiz, A et al. Metodología para la Simulación Acelerada del Deterioro que por Corrosión Atmosférica se Presenta en Equipo Electrónico. Ingeniería Investigación y Desarrollo, Vol. III No. 4, 2002
6. Guttenplan, J. D. Corrosion in the Electronics Industry. Metals Handbook, ASM International, Vol. 13,1987
7. Gouda, V. K., Carew, J. A., Riad, W.T. Investigation of Computer Hardware Failure due to Corrosion. British Corrosion Journal, Vol. 24, 192, 1989
8. White, E., Slensky, G., Dobbs B. Case Histories and Failures of Electronics and Communications Equipment. Metals Handbook, ASM International, Volumen 13, 1987
9. García, E. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, 4a edición, Instituto de Geografía UNAM, 1988
10. International Electrotechnical Commission, 68-2-42, Test K_c SO₂
11. International Electrotechnical Commission, 68-2-43, Test K_d H₂S
12. JEIDA-32, Japanese Electronic Industry Development Association, Standard on H₂S, Japón 1974.
13. JEIDA-25, Japanese Electronic Industry Development Association, Standard on SO₂, Japón 1974.
14. British Standard BS 2011, Parte 2.1, BSI, Londres , 1971.
15. German Standard DIN 40046 Partes 36 y 37, Beunth, Berlin, 1979.
16. Zakipour, S., Leygraf, C. Evaluation of Laboratory Tests to Simulate Indoor Corrosion of Electrical Contact Materials, Journal of the Electrochemical Society, Vol 133, 21, 1986
17. Zakipour, S. Tidblad, J., Leygraf C. Atmospheric Corrosion Effects of SO₂ , NO₂, and O₃, Journal of the Electrochemical Society, Vol 144,3513, 1997
18. Oesh, S., Faller, M., Environmental Effects on Materials: The Effect of the Air Pollutants SO₂, NO₂, NO and O₃ on the Corrosion of Copper, Zinc and Aluminium A Short Literature Survey, and Results of Laboratory Exposures, Corrosion Science, Vol. 39, 105, 1997
19. Roberge, P.R., Handbook of Corrosion Engineering, Mc Graw-Hill, USA, 2000
20. Leygraf, C., Graedel, T. Atmospheric Corrosion, John Wiley & Sons, New York, 2000
21. Svensson, J.E., Johansson, L.G. A Laboratory Study of the Effect of Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulphure Dioxide on the Atmospheric Corrosion of Zinc. Journal of the Electrochemical Society, Vol. 140, 1997
22. Graedel, T.E. et al. Ozone and Photoenhanced Atmospheric Sulphidation of Copper. Science, Vol 224, 1984
23. Graedel, T.T. GILDES Model Studies of Aqueous Chemistry. Formulation and Potential Applications of the Multiregimen Model. Corrosion Science, Vol. 38, 1996

24. Jenkin, M.E., Clemitshaw, K.C. Ozone and Other Secondary Photochemical Pollutants: Chemical Processes Governing their Formation in the Planetary Boundary Layer. *Atmospheric Environment*, 34, 2000
25. Wesshler, Ch., Hodgson, A., Wooley, J. Indoor Chemistry: Ozone, Volatile Organic Compounds and Carpets. *Environmental Science and Technology*. American Chemical Society Vol. 26. No 12, 1992
26. Strandberg, H., Johansson, L. Role of O₃ in the Atmospheric Corrosion of Copper in the Presence of SO₂. *Journal of the Electrochemical Society* Vol. 144, No. 7, 1997
27. Arroyave, C., Morcillo, M., The Effect of Nitrogen Oxides in Atmospheric Corrosion of Metals., *Corrosion Science*, Vol. 37, 293, 1995
28. White, E., Slensky, B. Dobbs. Case Histories and Failures of Electronics and Communications Equipment. *Metals Handbook*, ASM International, Volumen 13,1987
29. Steinmayer, R.F. Land Vehicle, Management, in AGARD. Lecture series No. 141 Neully-sur-Seine, France,NATO,1985
30. ISO 9223:1992 (E). Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres-Classification. International Standard Organization, 1992
31. ISO 9224:1992. Corrosion of Metals and Alloys -Corrosivity of Atmospheres- Guiding Values for the Corrosivity Categories. International Standard Organization, 1992
32. ISO 9225: 1992. Corrosion of Metals and Alloys- Corrosivity of Atmospheres-Measurements of Pollution. International Standard Organization, 1992
33. ISO 9226:1992. Corrosion of Metals and Alloys, Corrosivity of Atmospheres-Determination of Corrosion Rate of Standards Specimens for the Evaluation of Corrosivity. International Standard Organization, 1992
34. Summitt, R., Fink, F. PACERLIME: An Environmental Corrosion Severity Classification System AFWAL-TR-80-4102, 1980
35. Rice, D.W., Cappel, R. J., Kinsolving, W., Laskowski, J. Indoor Corrosion of Metals., *Journal of the Electrochemical Society*, Vol.127, 1980
36. Rice, D.W., Peterson, P., Rigby, E.B., Phipps, P.B.P., Cappel, R.J. and Tremoureux, R.: Atmospheric Corrosion of Copper and Silver. *Journal of the Electrochemical Society*. Vol 128, No 2. 1981.
37. Rice, D.W., Phipps, P.B.P., Tremoureux, R.: Atmospheric Corrosion of Nickel. *Journal of the Electrochemical Society*. Vol 127, No 3. 1980
38. ASTM Designation G50-76, 84. Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals. American Society for Testing Materials, 1984
39. Fukuda, Y., et al. Indoor Corrosion of Copper and Silver exposed in Japan an Asian Countries. *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 138, 1991
40. Tidblad, J., Leygraf, C.: Acid Deposition Effects on Materials: Evaluation of Nickel and Copper. *Journal of the Electrochemical Society*. Vol. 138 No. 12, 1991.
41. Cordner, R. Atmospheric Corrosion Survey of New Zealand,. *British Corrosion Journal*, Vol 125, 1990.
42. Elshawesh, F. Atmospheric Corrosion of Aluminium Conductor. *British Corrosion Journal*. Vol 32, 1997
43. Vilche, R., et al. A Survey of Argentinian Atmospheric Corrosion. *Corrosion Science*, Vol 34, 1997
44. Feliu, S., Morcillo, M. Corrosion in Rural Atmospheres in Spain. *British Corrosion Journal*, Vol. 22, 1987

45. ASTM designation G85-85, 90. Standard Practice for Modified SALT Spray (Fog Testing) American Society for Testing Materials, 1990
46. ASTM designation G87-84, 90. Standard Practice for Conducting Moist SO₂ Tests. American Society for Testing Materials, 1990
47. ASTM designation G60-86. Standard Test Method for Conducting Cyclic Humidity Test American Society for Testing Materials, 1986
48. Sharman, S.P., Thomas, J.H., Bader, F.E. Development of a Gentle Accelerated Corrosion Test., *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 125, 2002, 1978
49. Sterling, A., Atrens, A., Smith, Y. Accelerated Atmospheric Corrosion of Copper and Copper Alloys. *British Corrosion Journal*, Vol. 25, 1990
50. Baboian, R. Electronics. Electrochemical and Corrosion Laboratory, Texas Instruments Inc., 2002
51. Sinclair, J.D., Corrosion of Electronics. *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 135 89c, 1988
52. Osenbach, J. Corrosion- Induced Degradation of Microelectronic Devices. *Semiconductor Science Technology* Vol. 11, 1996
53. Abbott, W. Atmospheric Corrosion of Control Equipment. The Materials Technology Institute of the Chemical Process Industries, Inc. NACE International, 1993
54. Carrato, A., Shaffer, I., Richwine, R. Corrosion in Naval Aircraft Electronics Systems. *Corrosion 78*, National Association of Corrosion Engineers, NACE, 1978
55. Guttenplan, J., Hasimoto, L. Corrosion Control for Electrical Contacts in Submarine Based electronic equipment. *Materials Performance*, Vol. 18, 1978
56. Department of the navy. Design guidelines for prevention and control of avionic corrosion. *Navmat p 4855-2*, 1983
57. Mendoza, A.R., Corvo, F. Outdoor and Indoor Corrosion of Carbon Steel, *Corrosion Science*, 41, 1999.
58. Mendoza, A.R., Corvo, F. Outdoor and Indoor Corrosion. *Atmospheric Corrosion of Non-ferrous Materials*, *Corrosion Science*, 42, 2000.
59. Corrosive Effects of Phosphine, Carbon Dioxide, Heat and Humidity on Electronic Equipment. Agriculture and Agri-Food Canada, 2000
60. Kim, A., Crampton, G., Kanabus-Kaminska, M. Corrosion Effect of Hydrogen (HF) on Electronic Components. *Proceedings of the 7th. Fire Supresión and Detection Research Application Symposium*, Orlando Florida, 2003
61. Sharman, S.P. Atmospheric Corrosion of Silver, Copper and Nickel Environmental Test. *Journal of the Electrochemical Society. Solid State Science and technology*, 1978
62. Abbott., W. Corrosion of electrical contacts: review of flowing mixed gas test developments., *British Corrosion Journal*, Vol. 14, 153, 1989.
63. R. D. Smith., An accelerated atmospheric corrosion test (AACT), *Atmospheric corrosion of engineering metals ASTM STP 646*, 160
64. Campbell, W. Thomas, U. Tarnish Studies. *Transaction Electrochemical Society*, Vol. 76, 1939
65. ISA-S.71.04-1985. Standard Environmental Conditions for Process Measurements and Control System: Airborne Contaminants , *Instrument Society of America*, 1985.
66. Sullivan, M., Voegborio, B., The Effect of Smoke Particulate Pollutant on Atmospheric Corrosion, *Corrosion Prevention and Control*, 1989.

67. ASTM B177-90. Standard Test Method of Salt Spray (Fog Testing), American Society for Testing Materials, 1990
68. ASTM B827-97. Standard Practice for Conducting Mixed Flowing Gas Environmental Tests, American Society for Testing Materials, 1997
69. ASTM B845-97. Standard Guide for Mixed Flowing Gas Tests for Electrical Contacts, American Society for Testing Materials, 1997
70. ASTM B810-01a. Standard Method for Calibration of Atmospheric Corrosion Test Chambers by Change in Mass of Copper Coupons, American Society for Testing Materials, 2001
71. ASTM B825-97. Standard Test Method for Coulometric Reductions of Surface Films on Metallic Test Samples, American Society for Testing Materials, 1997
72. ASTM B826-97. Standard Test Method for Monitoring Corrosion Tests by Electrical Resistance Probes, American Society for Testing Materials, 1997
73. ASTM B808-97. Standard Test Method for Monitoring of Atmospheric Corrosion Chambers by Quartz Crystal Microbalances, American Society for Testing Materials, 1997
74. Abbott, W. Materials, Environment, Motion and Electrical Contact Failure Mechanisms, Electrical Contacts, IEEE, 1989
75. Abbott, W. The Development and Performance Characteristics of Flowing Mixed Gas Test Environments, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol.11, 1989
76. EIA Standard TP-65A, Mixed Flowing Gas, Electronic Industries Association, 1998.
77. IEC Standard 68-2-60, Environmental Testing Part 2, Flowing Mixed Gas Corrosion Test, International Electrotechnical Commission, 1995.
78. Williams, D., The Effect of Test Environment on the Creep of Base Metal Surface Films over Precious Metal Inlays, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Vol. 11, 1988.
79. UNEP/WHO Urban Air Pollution in Megacities of the World, 1992
80. Health, Environment and Development Program. Urban Air Pollution Risks to Children: A Global Environmental Health Indicator. World Resources Institute, EUA, 1999
81. Segundo Informe sobre la Calidad del Aire en Ciudades Mexicanas (datos de 1995), INE-CENICA-JICA, 1997
82. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Información Geográfica, 2003.
83. Cerrud, S., Jacobo, V. Ortiz, A., Schouwenaars, R. Análisis de Falla, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2002.
84. Meeker, W. Q., Escobar, L.S. Statical Methods for Reliability Data, John Wiley & Sons Inc, 1998
85. Toshiba. Testing for Reability, 2002
86. Repp, J. Accelerated Testing Truths and Misconceptions. Materials Performance, Sep 2002
87. Rocha. Tropicorr Project-Effects of Tropical Environments on Electro-Electronic Products. Corrosion Reviews. Vol 21. Nos. 5-6,2003
88. Douthit. Electronics and Corrosion. Corrosion Reviews. Vol 21. Nos. 5-6, 2003

Referencias Adicionales

- a. Uhlig, H., The Corrosion Handbook, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2000
- b. Fontana, M. G., Corrosion Engineering, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1985
- c. Jones, D. Principles and Prevention of Corrosion, Prentice Hall, USA, 1996
- d. Marcus, P. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, Marcel Dekker Publisher, 2002
- e. Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Echlin, P., Joy, D.C., Romig, A.D., Lyman, C.E., Fiori, C. and Lifshin, E. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, 2nd Edition. Plenum Press, New York, 1992.
- f. Pourbaix, M., Pourbaix, A. Recent Progress in Atmospheric Corrosion Testing., Corrosion Engineering., Vol. 45, 71, 1989
- g. Walter, G.W., Laboratory Simulation of Atmospheric Corrosion by SO₂, Corrosion Science., Vol. 32, 1331, 1991
- h. Sinclair, J.D., Psota-Kelty, L.A., Weschler, C.J., Shields, H.C. Deposition of Airborne Sulphate, Nitrate and Chloride Salts as it Relates to Corrosion of Electronics. Journal of the Electrochemical Society. Vol 137, No4, 1990.