

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**"CARACTERIZACIÓN DE LA CORROSIÓN EN MATERIALES METÁLICOS
DE LA INDUSTRIA ELECTRÓNICA EN MEXICALI, B.C."**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA

GUSTAVO LÓPEZ BADILLA

DIRECTOR

DR. BENJAMÍN VALDEZ SALAS

CODIRECTOR

DR. ROUMEN ZLATEV

Mexicali, B. C.

Noviembre del 2008

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa

Irene por los bellos momentos de su vida que no compartí y su apoyo en mi estudio doctoral.

A mi querida hija Irina Alessandra

Por los bellos momentos de su vida que no compartí.

A mis padres

Gustavo y Lourdes, por su apoyo, confianza y en la motivación de alcanzar grandes metas en la vida.

A mis hermanos

Jaime, Julio y Alma Angélica, por su apoyo incondicional y confianza en mis logros.

Con profundo agradecimiento al Dr. Benjamin Valdez Salas, director de esta tesis, por su apoyo incondicional, confianza y paciencia en la realización y dirección de la investigación

Al Dr. Roumen Zlatev, por su gran apoyo y realización de procesos experimentales para la investigación.

A los integrantes del Comité Revisor de Tesis: Dra. Mónica Carrillo Beltrán, Dr. Miguel Schorr Wiener, Dr. Alejandro Martínez Ruiz y Dr. Juan de Dios Díaz Ocampo, por sus apreciables indicaciones y contribuciones para el mejoramiento de la tesis de investigación.

A mis maestros y personal del Instituto de Ingeniería que hicieron posible la realización de mis metas.

A las empresas que brindaron la oportunidad de realizar la investigación.

Con gratitud en el análisis experimental a la M.C. Lidia Vargas y Dr. Juan Manuel Cobo Rivera por su apoyo con sus sugerencias.

Índice de figuras

	Página
Figura 1.1 Etapas de operación de una industria electrónica	2
Figura 1.2 Figura 2. Localización geográfica de empresas con problemas de corrosión en Mexicali	7
Figura 1.3 Análisis de metales:(a) antes y (b) después de la corrosión por sulfatos	9
Figura 2.1 Equipo electrónico contaminado con polvo	22
Figura 2.2. Fuentes antropogénicas de contaminación del aire de automóviles e industrias	24
Figura 2.3. Balance de materia para el análisis cuantitativo de la calidad del aire en interiores	25
Figura 2.4. Estaciones de monitoreo: (a) ambiental y (b) meteorológico	28
Figura 2.5. Corrosión uniforme de una placa de acero al carbono	36
Figura 2.6. Corrosión galvánica en tornillo de acero inoxidable sujeto a una lamina de aluminio	37
Figura 2.7. Corrosión por esfuerzo en acero al carbono con grietas ramificadas	39
Figura 2.8. Corrosión por hendiduras en probetas de estaño	40
Figura 2.9. Corrosión por picaduras probetas de níquel	41
Figura 2.10. Corrosión por exfoliación en tanque de acero inoxidable aleado con aluminio	41
Figura 2.11. Erosión-corrosión en tanque de aluminio	42
Figura 2.12. Corrosión microbiana en cobre	48

	Página
Figura 2.13. Proceso electrolítico que origina la corrosión atmosférica	53
Figura 3.1 Estructura dimensional de las probetas metálicas	53
Figura 3.2. Cabina metálica para ensayos de corrosión bajo condiciones de interior de plantas simuladas	60
Figura 3.3. Detalle del montaje de muestras metálicas e instrumentación con higrómetro de la cabina de simulación de condiciones de interiores para ensayos de corrosión	62
Figura 3.4. Diseño estructural de la cabina de simulación para la velocidad de corrosión de las probetas metálicas	62
Figura 3.5. Método de instalación de los platos de sulfatación	64
Figura 3.6. Características dimensionales de los platos de sulfatación	65
Figura 3.7 Etapas de preparación de la técnica de los platos de sulfatación	66
Figura 3.8. Etapas de análisis con la técnica de los platos de sulfatación	67
Figura 3.9. Etapas del (a) inicio, (b) fin de exposición y (c) análisis químico de la vela húmeda	70
Figura 3.10 Microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscopy)	72
Figura 3.11 Analizador SEM/EDS	73
Figura 3.12 Adquisición de la imagen SEM	73
Figura 3.13 Análisis de profundidad de la generación de las señales del SEM	74
Figura 3.14 Proceso de bombardeo de haz de electrones en una muestra	75

	Página
Figura 3.15 Localización de los detectores en el interior de la cámara del microscopio de barrido	75
Figura 4.1. Tiempo de Humectación por horas en la ciudad de Mexicali	77
Figura 4.2. Distribución porcentual del comportamiento del TH (tiempo de humectación) durante el año 2003	75
Figura 4.3. Fracción Parcial del Tiempo de Humectación-FPTH (Febrero y Agosto del 2003)	80
Figura 4.4. Evaluación de concentración mensual de contaminantes del aire en Mexicali (2003)	81
Figura 4.5. Correlación de velocidad de corrosión con los parámetros climáticos T y HR con el contaminante SO ₂ en el mes de Febrero del 2003	83
Figura 4.6. Correlación de velocidad de corrosión con los parámetros climáticos T y HR con el contaminante SO ₂ en el mes de Agosto del 2003	83
Figura 4.7. Velocidad de corrosión del cobre expuesto en la cabina de simulación en invierno de 2003	85
Figura 4.8. Velocidad de corrosión del cobre expuesto en la cabina de simulación en verano de 2003	86
Figura 4.9. Correlación de factores climáticos de T, HR y contaminantes atmosféricos con los índices de corrosividad	87
Figura 4.10. Fuentes de emisión de contaminantes del aire en la ciudad de Mexicali	88

	Página
Figura 4.11. Análisis de la velocidad de corrosión de cinco distintos metales en la experimentación bajo condiciones simuladas en el periodo de 2003 a 2005	89
Figura 4.12. Análisis de la velocidad de corrosión de cinco distintos metales bajo condiciones interiores de la industria electrónica en el periodo de 2003 a 2005	90
Figura 4.13. Evaluación de velocidad de corrosión del cobre en Mexicali en el periodo 2003 a 2005	97
Figura 4.14. Análisis de EDS del cobre antes de la exposición para el estudio.	98
Figura 4.15. Micrografía de SEM (X50) sobre una superficie del cobre en Mexicali a los seis meses de exposición la cabina de simulación	98
Figura 4.16 Micrografía de SEM (X400) sobre una superficie de cobre en Mexicali a los seis meses de exposición la empresa Accuride Int.	99
Figura 4.17. Micrografía de SEM (X220) sobre una superficie de cobre en Mexicali al año de exposición la cabina de simulación	99
Figura 4.18. Micrografía de SEM (X1500) que muestra los productos de corrosión sobre una superficie de cobre al año en la empresa FEMSA	100
Figura 4.19. Análisis de EDS del cobre en Mexicali a los seis meses de exposición en la cabina de simulación	100
Figura 4.20. Evaluación de velocidad de corrosión del estaño en Mexicali (2003 – 2005)	101
4.21 Microfotografía de SEM (X500) sobre una superficie del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición la cabina de simulación	102

	Página
Figura 4.22 Microfotografía de SEM (X500) sobre una superficie del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición la empresa FURMEX	102
Figura 4.23 Microfotografía de SEM (X500) de manchas sobre una superficie del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición el cuarto limpio de la empresa TELEPLAN	103
Figura 4.24. Análisis de EDS del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición en la cabina de simulación	103
Figura 4.25. Análisis de EDSX del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición en la empresa FURMEX	104
Figura 4.26. Análisis de EDX del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición en la empresa FURMEX	104
Figura 4.27. Evaluación de velocidad de corrosión del níquel en Mexicali (2003 - 2005)	106
Figura 4.28. Micrografía de SEM (X500) sobre una superficie del níquel en Mexicali a los seis meses de exposición la cabina de simulación	107
Figura 4.29. Micrografía de SEM (X500) sobre una superficie del níquel en Mexicali a los seis meses de exposición la empresa HONEYWELL	107
Figura 4.30. Análisis de EDS del níquel en Mexicali a los seis meses de exposición en la cabina de simulación	108
Figura 4.31. Análisis de EDS del níquel en Mexicali a los seis meses de exposición en el cuarto limpio de la empresa TELEPLAN	108

	Página
Figura 4.32. Evaluación de velocidad de corrosión de la plata en Mexicali en la cabina de simulación en el periodo del 2003 al 2005	110
Figura 4.33. Micrografía de SEM (X100) sobre una superficie de la plata en Mexicali a los seis meses de exposición la cabina de simulación	110
Figura 4.34. Micrografía de barbas de sulfuro de plata SEM (X500) sobre una superficie de la plata en Mexicali a los seis meses de exposición la empresa FURMEX	111
Figura 4.35 Micrografía de SEM (X5000) indicando la película de productos de corrosión sobre una superficie de la plata en Mexicali a los seis meses de exposición la empresa FURMEX	111
Figura 4.36. Análisis de EDX de la plata en Mexicali a los seis meses de exposición en la cabina de simulación	112
Figura 4.37. Análisis de EDS de la plata en Mexicali a los seis meses de exposición en empresa HONEYWELL	112

Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1. Nivel de categorías del tiempo de humectación en metales	23
Tabla 2.2. Estándares de calidad del aire en la frontera de México y Estados Unidos	29
Tabla 3.1. Los factores climáticos y su medición	57
Tabla 4.1. Evaluación del tiempo de humectación mensual y anual en Mexicali (ISO 9223)	81
Tabla 4.2. Niveles de SO ₂ medidos con la técnica de platos de sulfatación en la planta Accuride Internacional en el periodo de Febrero a Septiembre del 2007	93
Tabla 4.3. Concentración de cloruros medidos con el método de la vela húmeda en la planta Teleplan en el periodo de Febrero a Septiembre del 2006	90
Tabla 4.4. Sulfuros de cobre encontrados en la película de corrosión por sulfidación de superficies metálicas de cobre expuestas en condiciones atmosféricas de Mexicali durante 2007	96

INDICE GENERAL

	Página
Agradecimientos	
Lista de figuras	
Lista de tablas	
Resumen	
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Planteamiento del problema	6
1.3 Justificación del estudio	8
1.4 Descripción del proyecto	10
1.5 Objetivo general y específicos	11
1.6 Alcances y metas	12
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Industria electrónica	14
2.2 Metales usados en la industria electrónica	15
2.3 Funcionalidad de equipos electrónicos	16
2.3.1 Calidad de ambientes interiores de la industria electrónica	18
2.3.2 Análisis de operatividad de equipos electrónicos	19
2.3.3 Pruebas de ensayo en equipos de la industria electrónica	20
2.3.4 Causas que influyen en fallas eléctricas de equipos electrónicos	21
2.4 Análisis del clima en Mexicali	21

	Página
	21
2.4.1 Influencia del tiempo de humectación	23
2.5 Contaminación del aire	23
2.5.1 Calidad del aire en Mexicali	27
2.6 Fundamentos de corrosión	29
2.6.1 Costos generados por la corrosión	30
2.6.2 Velocidad de corrosión	32
2.7 Control de la corrosión	34
2.7.1 Corrosión en zonas áridas o semidesérticas	35
2.8 Clasificación de la corrosión	36
2.8.1 Factores físico-químicos de la corrosión	43
2.8.2 Importancia de la corrosión para la industria electrónica	44
2.8.3 Corrosión en equipos electrónicos	47
2.8.4 Casos de corrosión en interiores de la industria electrónica	49
2.8.5 Métodos y técnicas de control de la corrosión en la industria electrónica	51
2.9 Corrosión atmosférica	53
2.10 Diseño estructural de los equipos electrónicos	55
Capítulo 3. METODOLOGÍA	57
3.1 Instrumentos de medición de parámetros climáticos	57
3.2 Información estadística de contaminación atmosférica y velocidad de corrosión de probetas metálicas	59

	Página
3.3 Herramientas de MatLab	59
3.4 Equipos de monitoreo ambiental	60
3.5 Exposición de probetas metálicas	61
3.6 Métodos de medición	62
3.6.1 Análisis gravimétrico	64
3.6.2 Técnica de platos de sulfatación	64
3.6.3 Métodos de análisis de cloruros con la vela húmeda	68
3.6.4 Microscopia electronica de barrido (SEM)	71
3.6.5 Análisis químico (EDS)	72
Capítulo 4. RESULTADOS	76
4.1 El clima en Mexicali	76
4.2 Los contaminantes del aire en Mexicali	81
4.3 Análisis de probetas metálicas	84
4.4 La corrosión en la industria electrónica de Mexicali	84
4.5 Niveles de corrosividad	86
4.6 Monitoreo de sulfatos con la técnica de platos de sulfatación	91
4.7 Prueba de la vela húmeda para detectar cloruros	92
4.8 Corrosión atmosférica en interiores de la industria electrónica	93
4.8.1 Corrosión de probetas metálicas en la cabina de simulación y ambientes interiores de la industria electrónica	93
CONCLUSIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	119

GLOSARIO

ANEXOS

PRODUCTOS ACADEMICOS

RESUMEN.

La importancia de analizar el fenómeno de corrosión en materiales metálicos utilizados en la industria electrónica de Mexicali, es evaluar los niveles de corrosividad en los interiores de las empresas para determinar el grado de deterioro de dichos materiales. Los metales utilizados en las pruebas de evaluación son: acero al carbono, cobre, estaño, níquel y plata. Además se obtuvo información sobre los agentes contaminantes que se adhieren a los metales mediante un análisis de superficie, con la finalidad de establecer controles de contaminantes suspendidos en la atmósfera. Se determinó controlar parámetros climáticos como humedad y temperatura, para evitar la formación de una película húmeda en superficies metálicas que fomenta la corrosión.

El deterioro de los materiales por corrosión genera un mal funcionamiento de los dispositivos y equipos electrónicos debido a fallas eléctricas ocasionadas por vías de conductividad (dendritas) entre conexiones que no deben estar unidas. La formación de dendritas se debe a la migración de iones metálicos liberados por el proceso de corrosión, presentándose un voltaje. Así, se generan corrientes eléctricas del orden de micro amperios en los componentes alterando su funcionamiento por fallas eléctricas, y disminuyendo su rendimiento operacional. La mayoría de los componentes requieren valores específicos de corriente y voltaje para su operación, o de lo contrario, dejan de funcionar. El fenómeno de corrosión observado en los distintos materiales metálicos utilizados en la industria electrónica es semejante en algunas etapas, como lo indica la investigación realizada. Sin embargo, los metales analizados presentaron diferentes tipos de corrosión en su etapa final, dependiendo de las condiciones ambientales. La corrosión es una situación problemática en la industria electrónica, aún en cuartos limpios. Elaborar

pruebas para detectar el origen y la ocurrencia de corrosión, es difícil por la complejidad de los componentes electrónicos y falta de climas controlados en interiores de la industria electrónica.

Los factores climáticos, aunados a las partículas finas y a gases como el ácido sulfhídrico, bióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, que en ocasiones sobrepasan los estándares de calidad del aire de la región, generan ambientes agresivos que originan la corrosión. Estas partículas contaminantes se adhieren a las superficies metálicas con o sin la película formada por variaciones climáticas y se inicia el proceso de corrosión. Estos contaminantes son detectados por equipos especializados de Estaciones de Monitoreo Ambiental (EMA) instaladas en la ciudad de Mexicali. Una vez emitidos, los contaminantes atmosféricos por fuentes exteriores como el tráfico vehicular, las plantas industriales, campos geotérmicos, la erosión del suelo y microorganismos, penetran a los interiores de la industria electrónica.

Los contaminantes del aire emitidos por las actividades industriales, geotérmica y vehicular, principalmente se dispersan por los flujos de aire que se presentan en la ciudad y se depositan en las superficies metálicas de contactos electrónicos de equipos electrónicos. Además, con niveles mayores al 80% de humedad y 25° C comunes en la ciudad de Mexicali, se obtienen los ciclos del tiempo de humectación, que indica los periodos en los cuales una superficie metálica permanece lo suficientemente húmeda para dar paso que el proceso electroquímico de corrosión ocurra. Es también importante considerar que en los interiores de la industria electrónica se generan contaminantes a base de vapores de solventes, pinturas, plásticos, actividades de manufactura y operaciones de limpieza, aunados a la contaminación del exterior indican los niveles de

corrosividad. En este proyecto de investigación, se determinaron los niveles de corrosividad por dos métodos:

- a. La exposición de probetas metálicas a los ambientes de interiores por periodos de 1, 3, 6, 12 y 24 meses; para posteriormente obtener la pérdida de peso con el método gravimétrico y calcular la velocidad de corrosión mientras las partículas que se adhieren a los metales son estudiadas con técnicas de análisis de superficie.
- b. La evaluación de los niveles de humedad y temperatura monitoreados con equipos especializados en Estaciones de Monitoreo Meteorológico (EMM) instaladas en Mexicali, obteniendo las concentraciones de contaminantes exteriores de las EMA, que influyen en los ambientes interiores.

Todos los análisis realizados en esta investigación se basaron en estándares ASTM e ISO. Se aplicó el estándar ISO 9223 para evaluar la velocidad de corrosión de los metales, determinando que el acero al carbono, cobre y plata son los que tienen una categoría de corrosividad mayor a aquella presentada por el estaño y níquel. Aún cuando el acero al carbono se deterioró al mismo nivel que el cobre y la plata, estos dos últimos se evaluaron con mayor detalle por ser los más utilizados en conexiones y conectores de los equipos electrónicos.

En el periodo de exposición en la cabina metálica y en el interior de varias empresas de la ciudad de Mexicali, el cobre se cubrió con una película de cuprita (Cu_2O) y la plata presentó manchas no uniformes compuestas principalmente de Ag_2S y AgCl como productos de corrosión. Desde el primer mes de exposición tanto en la cabina de simulación como en las empresas donde se realizaron los análisis, las probetas de cobre presentaron manchas, siendo el indicador del fenómeno de corrosión. En los meses

posteriores, ocurrió la corrosión por picaduras en verano debido a la adsorción de gotas en diferentes áreas de la superficie metálica y corrosión uniforme en invierno por la condensación y formación en todo el metal.

Se formaron películas de óxidos en las probetas metálicas como producto de corrosión por la presencia de cloruros a los 3 meses de exposición, que originó fractura y corrosión por picaduras.

1. INTRODUCCIÓN.

Los avances tecnológicos en la industria electrónica exigen dispositivos electrónicos más pequeños, con mayor cantidad de componentes en sus encapsulados y el incremento de su funcionalidad. La tecnología Metal-Oxido-Semiconductor (MOS) desarrolla semiconductores de silicio con dimensiones de hasta 0.1 micrones (Lewis et al, 2004) y menos de 0.04 micrones (Austin et al, 2005). El número de funciones depende de la cantidad de componentes, que aumentan su capacidad de operación. La estructura del semiconductor de silicio protege los elementos internos de cambios climáticos, conexiones externas al chip y puede disipar el calor generado internamente.

La gran ventaja de usar materiales y estructuras metálicas de cobre para los circuitos integrados, es que aumentan la resistencia térmica del chip y tienen un rápido tiempo de respuesta (Abdulaziz, 2003).

En la industria electrónica de la ciudad de Mexicali, existe una gran variedad de dispositivos y equipos electrónicos que en ocasiones y aún en el interior de las plantas, se exponen a ambientes sin control del clima y la contaminación del aire. Del total de empresas en esta ciudad, 80% son del ramo electrónico o tienen algún equipo electrónico, según lo informado por la Asociación de Maquiladoras de Mexicali (AMAQ, 2006). Los equipos que realizan procesos de manufactura y los artículos electrónicos que se fabrican, se exponen a ambientes que afectan su rendimiento operacional debido a fallas por corrosión. En la manufactura de dispositivos y sistemas electrónicos, donde se usan equipos electrónicos, se desarrollan cuatro etapas principales (Figura 1.1): En la zona de almacenamiento se recolectan los materiales que se requieren para el producto que se

fabrica en área de manufactura, se inspecciona y una vez finalizado se lleva a embarques para ser enviado al cliente, quien será el usuario del artículo fabricado.

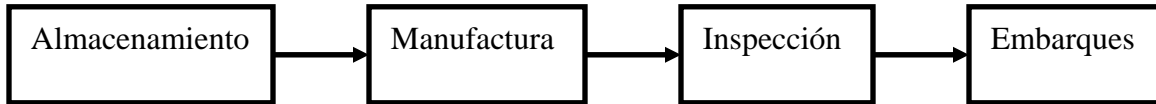


Figura 1.1. Etapas de operación de una industria electrónica.

Los niveles de humedad y temperatura de ambientes exteriores como los presentes en Mexicali, además de las concentraciones de ciertos contaminantes de fuentes emisoras exteriores como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y sulfuros que penetran por pequeños orificios, rendijas o sistemas de aire acondicionado; influyen en las condiciones interiores y originan ambientes agresivos favorecen la corrosión. El fenómeno de corrosión en conexiones de equipos electrónicos de plantas industriales preocupa a los especialistas de diseño y corrosión (Frankel, 1995). Existen dispositivos y sistemas electrónicos con especificaciones de funcionalidad muy rigurosos; principalmente los de tipo militar son fabricados en cuartos aislados con un buen control de la contaminación y del microclima, además de usar materiales metálicos con alta resistencia a la corrosión. Otros componentes electrónicos son protegidos con materiales plásticos o metálicos que evitan la acción de la corrosión. La corrosión atmosférica es un fenómeno electroquímico debido a la película húmeda que se forma en las superficies metálicas, en ocasiones visible (Nishikata et al, 1995; Nishimura et al, 2000). Esta película es el electrolito donde se disuelve el metal, generando los iones metálicos, y por consiguiente el fenómeno de corrosión. Los productos de corrosión forman dendritas o *whiskers* en las conexiones y uniones de los conectores de equipos electrónicos. Una

característica de los componentes electrónicos es su diseño, con el cual se evita acumulación de agua, presencia de humedad y exposición directa de las uniones metálicas a ambientes agresivos; factores importantes en la formación de la capa electrolítica que cubre al metal. La película formada en la superficie metálica de equipos instalados en el interior de empresas, es más delgada **por...** de la que se forma en metales que están en el exterior. Se requiere de un análisis muy preciso para detectar el proceso electroquímico, indicando que la corrosión en condiciones de interior es diferente a la observada en el exterior de la industria electrónica. Es por esto que los analistas de corrosión, requieren de métodos y técnicas de evaluación con mayor capacidad de detección del proceso electroquímico y químico.

1.1 Antecedentes.

La contaminación en interiores de la industria electrónica genera grandes pérdidas económicas por el mal funcionamiento durante la prueba eléctrica de los equipos manufacturados en compañías del ramo electrónico.

Los equipos electrónicos se fabrican de acuerdo a su funcionalidad y resistencia a la corrosión. En la actualidad, los materiales más utilizados en la industria electrónica son aluminio, cobre, cromo, estaño, níquel, oro, paladio, platino, plata, titanio, tungsteno y aleaciones de cobre, estaño y paladio con plata (Henricksen et al., 1997).

La corrosión tiene efectos negativos en la salud de los seres vivos, la economía con pérdidas monetarias y ambientales con el deterioro del ecosistema. En 1998 se realizó un estudio comparativo en Estados Unidos de los costos generados por fenómenos naturales (\$17 billones dólares al año y 380 billones dólares en 22 años) y la corrosión generada en

la industria (\$276 billones dólares / año, 3.1 del PIB), indicando que era necesario evaluar los procesos que llevan a las pérdidas económicas por el daño ocasionado por corrosión (Gerhardus et al., 2006; Cai et al, 2005). Científicos y analistas de corrosión de metales, han desarrollado diversas investigaciones de corrosividad en probetas metálicas, instaladas en cabinas metálicas que simulan condiciones de interior de la industria electrónica, de acuerdo a estándares de la American Society Testing and Materials-ASTM, 2001 y los métodos de White et al., 1996. El clima de cada región influye en los factores característicos de la generación, tipo y velocidad de corrosión (Hasnik et al, 2000). Existe una diversidad de condiciones y factores que generan la corrosión, así como sus consecuencias. Los principales estudios que involucran factores climáticos y atmosféricos que generan corrosión son:

a. El realizado por el Battelle Memorial Institute para la National Bureau of Standard (**NBS-USA**, actualmente National Institute of Standards and Technology-NIST) en 1976 y actualizado en 1995, llamado “Economic Effects of Metallic Corrosion in the United States” (BMI, 2006; Virmani, 2006). El reporte menciona que las pérdidas económicas por los efectos de corrosión metálica fueron de 4.2% del producto interno bruto (PIB) en Estados Unidos. Esto conllevó a tomar precauciones en las industrias afectadas por corrosión, controlando los ambientes de interiores y protegiendo los materiales para prevenir la corrosión.

b. Un análisis del crecimiento de dendritas en uniones y contactos eléctricos de plata en equipos electrónicos, expuestos y contaminados con ácido sulfhídrico (H_2S) indicó que se producen fallas eléctricas en los equipos electrónicos (Bella, 2002). Se determinó la

composición química y morfológica de las dendritas de plata por medio de análisis SEM/EDX (Scanning Electronic Microscopy - Electro Dispersion of X Ray).

c. Un estudio elaborado por el Laboratorio de Corrosión y Materiales del Instituto de Ingeniería (LCMII) de la UABC en Mexicali en el año 2002 para la compañía Sony de esta ciudad (Valdez et al, 2002), indica que el uso de inhibidores de fase vapor evita la formación de películas de óxidos en conexiones de equipos electrónicos, por la presencia de oxígeno y ácido sulfhídrico.

d. El grado de ataque corrosivo en metales de equipos electrónicos, depende de las condiciones climáticas, como se menciona en un estudio realizado en la República Mexicana, en el 2005 (Cerrud et al., 2005). Se analizaron componentes electrónicos de tarjetas telefónicas en diversas regiones del país, en zonas con contaminantes del aire que sobrepasan los estándares de calidad del aire, humedad relativa de 80% y temperaturas mayores a lo 35° C, ocasionando niveles altos de corrosividad.

e. En el 2006, el LCMII, realizó una investigación para una empresa de la localidad, indicando que al cambiar del tipo de soldadura, era necesario utilizar otro fundente por tener que incrementar la temperatura (Valdez et al, 2006). El proceso de soldadura mostró deficiencias en la adhesión de los componentes a los tableros electrónicos, en las áreas con material de cobre. Esto ocurrió porque se limpiaban los tableros electrónicos con alcohol, sin ingresarlos rápidamente a la máquina de soldadura, por lo que se formaba una película delgada de óxido por el O₂ o sulfuro de cobre por el H₂S presente en la atmósfera interior, lo que impedía la adecuada soldabilidad de componentes electrónicos a los tableros electrónicos. Además, al usar fundentes no apropiados para la temperatura éstos se desintegraban y no eran adecuados para la adhesión de los

componentes. La corrosión es un fenómeno de mayor intensidad en regiones con grandes variaciones climáticas y altos niveles de contaminación. La industrialización ha conllevado a la modernización de las ciudades, como es el caso de la ciudad de Mexicali, donde se generan concentraciones de contaminantes que en ciertos periodos estacionales sobrepasan los estándares de calidad del aire; principalmente los óxidos de nitrógeno y sulfuros, que agregado al clima extremo (García, 2003), que se presentan tanto en invierno como en verano generan una alta corrosividad.

1.2 Planteamiento del problema.

Científicos del área de corrosión consideran que una mala operación de sistemas industriales se debe a la presencia de corrosión en sus uniones y conexiones eléctricas de sistemas de suministro de energía y componentes electrónicos. En ciertos periodos del año se presentan con más frecuencia fallas eléctricas en equipos electrónicos de plantas industriales de esta ciudad, lo cual preocupa al personal operativo. Esto crea un ambiente tenso en los empresarios de la industria electrónica porque origina grandes pérdidas económicas. La corrosión de metales utilizados en la industria electrónica de Mexicali, a condiciones de interior aparece como un proceso electroquímico, involucrando dos aspectos: el clima húmedo y seco de Mexicali como factor de la velocidad de corrosión en metales y el control del clima y la contaminación del aire en ambientes interiores para disminuir la corrosión en materiales metálicos, con pruebas de humedad y temperatura, además de exposición a contaminantes del aire como el H_2S . El interés mostrado por cinco empresas de la industria electrónica en la ciudad de Mexicali (Figura 1.2), en el fenómeno de la corrosión, permitió la instalación de metales en áreas de manufactura

para medir la velocidad de corrosión con testigos de acero al carbono, cobre, estaño, níquel y con ello conocer e informar a las compañías de los índices de corrosividad en el interior.

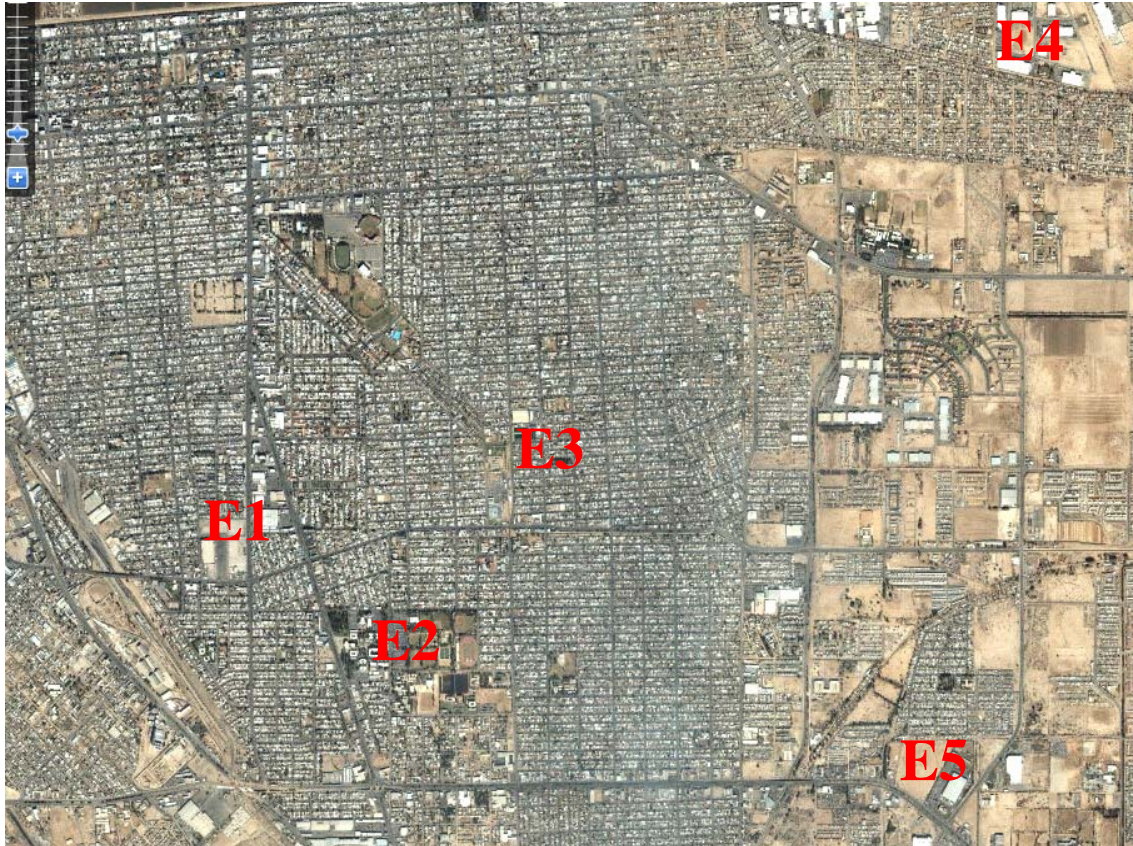


Figura 1.2. Localización geográfica de empresas con problemas de corrosión en Mexicali.
E1- FEMSA; E2- TELEPLAN; E3-HONEYWELL; E4-FURMEX y E5-ACCURIDE
Fuente. Mapa-Google.

Aun cuando se diseñan los equipos electrónicos de acuerdo a las condiciones ambientales y climáticas expuestas en su operación, esta ocurre cuando la combinación de parámetros de humedad, temperatura y contaminantes del aire registran valores que cumplen las condiciones que inician e incrementan el fenómeno de corrosión (Leygraf et al, 2000). La evaluación de contaminantes del aire en esta investigación en esta región, fue para conocer el que origina un efecto mayor en la generación de corrosión en metales de la industria electrónica y sus fuentes emisoras.

1.3 Justificación del estudio.

La oportunidad de instalación que brinda el gobierno municipal, estatal y federal de nuestro país en esta región, a empresas maquiladoras extranjeras, ha permitido la industrialización de la ciudad de Mexicali, siendo la mayoría de las empresas instaladas del ramo electrónico. Un análisis reportado del rendimiento operacional de equipos electrónicos ubicados en condiciones de interior de las cinco empresas donde se evaluaron los niveles de corrosividad, indico que las fallas eléctricas se incrementan hasta en un 40%. Esto ocurrió en los meses de julio y agosto cuando la humedad relativa y la temperatura son mayores al 70% y 40° C en ambientes de exterior. De diciembre a febrero se presenta el efecto invernadero, donde los contaminantes del aire no se dispersan fácilmente como en verano y la humedad es mayor al 80%. Esta información apoyo más a la hipótesis de comprobar que el clima y los contaminantes del aire que sobrepasan los estándares de calidad del aire de fuentes exteriores, que influyen en los ambientes interiores de la región, son parte esencial en la disminución de la operatividad de los equipos electrónicos (Neufeld, 1997).

La orografía plana de Mexicali y los vientos dominantes en algunos periodos del año, son factores importantes en la dispersión de partículas y gases contaminantes de 2.5µm y 10 µm en la región. Ciertos contaminantes emitidos en una zona de la ciudad y su valle, llegan a otras áreas y aún con menor grado de agresividad afectan a los materiales metálicos de condiciones de interior, lo que preocupa a todo el sector industrial. Es por esto, que se desarrolló esta investigación, para evaluar la corrosión atmosférica en

interiores de la industria electrónica de esta ciudad, y correlacionarla con el rendimiento de equipos electrónicos.

Además de los contaminantes del aire mencionados anteriormente, que influyen en el proceso de la corrosión, existen otro tipo de diminutas partículas de $2.5\mu\text{m}$ y $10\mu\text{m}$ que originan la formación de agentes corrosivos (Leidecker, 2006). Análisis en productos de corrosión en cobre, hierro níquel y zinc en interiores, indican una fuerte influencia de ácidos carboxílicos y especies orgánicas, como acetatos, formatos y oxalatos emitidos en el interior de las empresas por fuentes antropogénicas que junto a los provenientes del exterior y variaciones climáticas, generan la corrosión atmosférica (Roberge, 2000). Un ejemplo de la formación de agentes corrosivos es mostrado por un estudio realizado en Japón, con la comparación de los metales cobre y estaño, después de tres meses de exposición a sulfatos (Figura 1.3).

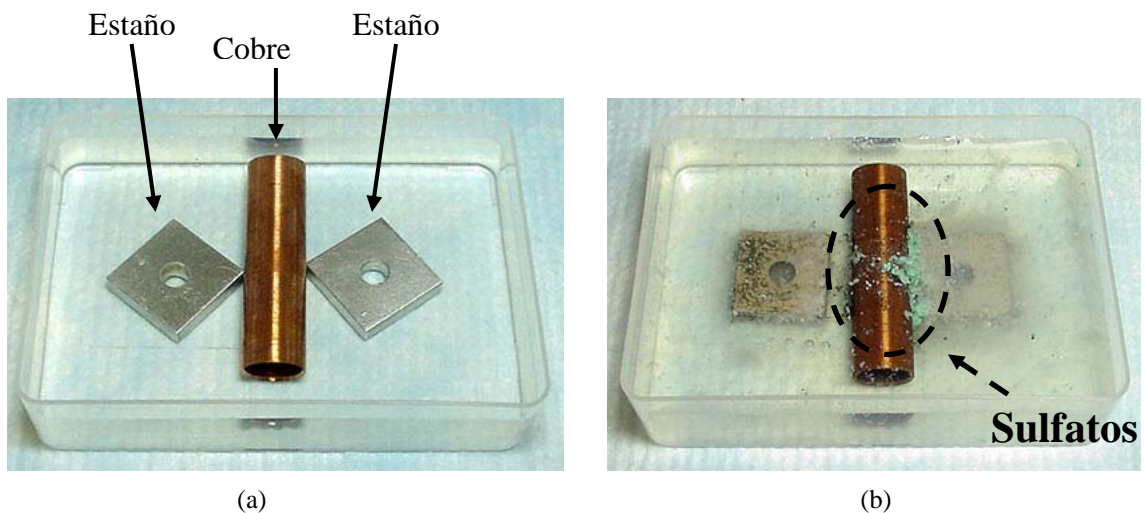


Figura 1.3. Análisis de metales: (a) antes y (b) después de la corrosión por sulfatos.

En la actualidad la normatividad diseñada para las evaluaciones del índice de corrosividad en condiciones de interior de planta cumplen con las condiciones ambientales en países más fríos. Esto significa que se tienen pocos estudios en regiones

tropicales, y no existen muchos casos reportados en zonas áridas y semiáridas como es el caso de la ciudad de Mexicali (Flores et al, 2003). Por esto, es necesario caracterizar el comportamiento de la corrosión en condiciones de interior en la industria electrónica instalada en esta región, e informar con los resultados obtenidos, de los métodos de protección adecuados para predecirla, prevenirla y controlarla.

1.4 Descripción del proyecto.

Este proyecto de investigación se realizó para conocer el efecto corrosivo de contaminantes del aire que se adhieren a las uniones y conexiones de equipos electrónicos de plantas industriales de la ciudad de Mexicali, B. C. El objetivo principal es comprender el fenómeno de corrosión que se genera en los materiales metálicos usados en la industria electrónica, para establecer medidas de prevención y control de la corrosión. En base a los parámetros atmosféricos y climáticos se obtuvo información de los niveles de corrosividad en los interiores de la industria electrónica.

Para llevar a cabo el estudio, se construyó una cabina metálica de 0.5 m^3 para simular el comportamiento de la corrosión atmosférica en interiores. Además y de esta manera se instalaron probetas metálicas en cinco empresas.

El método utilizado en este proyecto para medir la velocidad de corrosión es el gravimétrico, con el cual se conocen los índices de corrosividad tanto en la cabina de simulación como en las empresas. Con el análisis se simula el deterioro de las conexiones y conectores eléctricos, en ambientes agresivos con la presencia de cloruros, óxidos de nitrógeno, óxidos de carbono, sulfuros y variaciones de humedad y temperatura. El control del clima y contaminación del aire en interiores ayuda a reducir la corrosión en

materiales metálicos usados en la industria electrónica. Las empresas instaladas en Mexicali, tienen control del clima principalmente en áreas administrativas y en ciertos lugares de producción y almacén. En el verano, los niveles de humedad y temperatura llegan a sobrepasar el 80% y los 35° C respectivamente. Esto promueve procesos de corrosión electroquímicos aún en condiciones de cuartos limpios, donde se han observado manchas en superficies de cobre y la plata por efecto de la corrosión atmosférica. Para controlar el problema, ha sido necesario utilizar técnicas y métodos de protección, como los inhibidores de corrosión y tratamientos en superficies (Smailos et al, 1997).

1.5 Objetivo general y específicos.

Analizar la corrosión de metales producida por la atmósfera en condiciones de interior de la industria electrónica de la ciudad de Mexicali, a través de la medición y análisis de parámetros meteorológicos de clima y contaminantes dispersos en el aire, así mismo la evaluación de la velocidad de corrosión aplicando el método gravimétrico, así como también recomendar las medidas de prevención y control.

Los objetivos específicos son:

- Analizar referencias bibliográficas del fenómeno de corrosión y sus factores.
- Correlacionar factores atmosféricos y meteorológicos con fallas eléctricas de equipos electrónicos instalados en el interior de plantas industriales.
- Evaluar el efecto de la corrosión de metales de la industria electrónica por el método gravimétrico y análisis de superficie.

- Determinar los índices de corrosividad en condiciones de interior analizados en la cabina de simulación y en empresas.
- Dilucidar los posibles mecanismos de corrosión del cobre y otros metales utilizados en la industria electrónica.
- Presentar los resultados en artículos en revistas de divulgación y científicas y en la tesis.

Recomendaciones.

- Recomendar un clima controlado para evitar la formación de ambientes agresivos que influyan en los altos índices de corrosividad.
- Evaluar la factibilidad del empleo de inhibidores de corrosión de fase vapor para que no se genere corrosión en equipos electrónicos.

1.6 Alcances y metas.

Aun cuando este proyecto se realizó en condiciones de interior de la industria electrónica de la ciudad de Mexicali, también es de gran utilidad para evaluaciones en ambientes exteriores y para otro tipo de compañías y procesos industriales con componentes y equipos electrónicos. Con la información obtenida se conocerá los niveles de corrosividad que afectan a las uniones y conectores metálicos, donde se originan las fallas eléctricas, como sobrecarga eléctrica y falta de conductividad eléctrica en los equipos electrónicos. Además, se propone el uso de inhibidores de fase vapor para la reducción de la corrosión en este tipo de metales y controlar constantemente los niveles de humedad y

temperatura en ambientes interiores de la industria electrónica, para evitar que se origine el proceso electroquímico (Sereda, 1995).

Metas.

- Se analizará la bibliografía requerida sobre el tema de corrosión en condiciones de interior.
- Se aplicarán diferentes técnicas de análisis de datos climáticos, de contaminación y corrosión para obtener información del desarrollo del proceso de corrosión metálica en componentes electrónicos bajo condiciones de interiores.
- Se llevarán a cabo monitoreos de corrosión real en al menos 5 plantas manufactureras de componentes electrónicos localizadas en la ciudad de Mexicali.
- Se generará información para la industria electrónica de la ciudad de Mexicali que usan o fabrican equipos electrónicos en sus procesos.
- Con la base de datos de velocidad de corrosión de los metales evaluados, se recomendará prevenir, proteger y controlar la corrosión para evitar pérdidas económicas.
- Se publicarán los resultados validados de la investigación en revistas internacionales arbitradas e indexadas y en el reporte final de tesis de doctorado.

MARCO TEÓRICO.

2.1 Industria electrónica.

Las actividades en plantas industriales dedicadas a la manufactura de equipo electrónico han evolucionado fuertemente en los últimos 50 años. La investigación científica desarrollada en la industria electrónica durante la Segunda Guerra Mundial ayudó a revolucionar este campo y, a partir de la década de los 50's del siglo pasado hasta la actualidad, se han realizado estudios para mejorar los equipos electrónicos. Los grandes inventos como el transistor en 1957, los circuitos integrados o microchip en 1966 y los dispositivos de control integrado en 1968, desarrollaron la computadora en 1970, el microscopio electrónico en 1977 y algunos instrumentos de medición como el osciloscopio en 1978, que se usa frecuentemente en los procesos de la industria electrónica (Castejón, 1999; Ryder, 1996). Estos equipos electrónicos, revolucionaron los procesos industriales para aumentar la producción y mejorar la calidad de sus servicios y productos. Los equipos electrónicos contienen macro y micro componentes con características específicas de operación, que cumplen funciones según la capacidad de cada dispositivo; además de los conectores y uniones eléctricas de materiales metálicos, que permiten la conductividad eléctrica. La gran cantidad de conexiones entre componentes generan una resistencia eléctrica, y la falta de voltajes regulados en ciertas compañías, son causa de que no operen a su máxima capacidad (Velazco, 1996). Los procesos de manufactura requieren de instalación de dispositivos en estructuras, conteo de productos, detección de defectos y pruebas de conductividad eléctrica de los productos fabricados (Baboian et al, 2000; Chongchen, 2003). Un equipo industrial con conductividad eléctrica deficiente, no realiza las operaciones adecuadamente originando

defectos y causando pérdidas económicas (Camuffo et al, 1997; Lyon, 1996). La industria electrónica ha crecido enormemente en países del primer mundo y se ha incrementado gradualmente en los países subdesarrollados, con una amplia variedad de artículos que usamos en la vida cotidiana. En México, existen parques industriales con empresas de este tipo en la mayoría de los estados del país, como la ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y grandes ciudades fronterizas con los Estados Unidos, como Ciudad Juárez, Mexicali, Nogales, Reynosa y Tijuana. Un reporte de la Asociación de Maquiladoras (AMAQ) de Mexicali, indicó que en el 2006, estaban instaladas 150 empresas en esta ciudad, de las cuales 120 son de tipo electrónico (AMAQ, 2006); el resto de las empresas con otro giro industrial, que también tienen equipos electrónicos. En algunos periodos de invierno y verano, los factores atmosféricos y climáticos tienen un efecto negativo en el rendimiento productivo de los equipos, por lo cual, es importante evaluar su rendimiento operativo y evitar que dejen de funcionar (Dunbar, 1999; Kishira et al, 2005).

2.2 Metales usados en la industria electrónica.

La búsqueda de nuevos materiales resistentes a la corrosión para la industria electrónica, ha promovido el uso de metales con especificaciones más rigurosas que los hacen más costosos. Los ingenieros de corrosión consideran que usar metales nobles como el oro, paladio y platino principalmente, aun con precios altos, compensan la inversión económica porque reducen la generación de corrosión y optimizan la operatividad de los equipos utilizados en plantas industriales (Asami et al, 2003). Los principales metales utilizados en la industria electrónica, como el cobre, estaño y plata, tienden a corroerse en

ambientes agresivos, generándose dendritas que permiten la conductividad eléctrica en áreas no deseables, originando sobrecarga y falta de conducción de corriente eléctrica. Esto, disminuye el rendimiento de los componentes y equipos industriales por fallas eléctricas (Cole, 2004). Dependiendo de las propiedades de los materiales, a continuación se menciona la aplicación de algunos de ellos en los procesos de manufactura como:

a. Plata y cobre. Recubrimientos metálicos depositados en conectores eléctricos, y en tableros electrónicos.

b. Estaño. Se utiliza en la conexión entre semiconductores empaquetados y circuitos integrados, con soldadura.

c. Oro y cromo en conectores. En circuitos híbridos, como memorias electrónicas y en dispositivos de mayor potencia eléctrica y menor tamaño.

En el Anexo A se presentan otros materiales utilizados en procesos de la industria electrónica, de acuerdo a sus propiedades.

2.3 Funcionalidad de equipos electrónicos.

La eficiencia de operación de un equipo industrial se basa en la productividad que genera en una empresa, influenciada por factores climáticos y ambientales a los que se exponen. Las principales características que muestran la eficiencia productiva son la apariencia, costo-beneficio, facilidad de operación y mantenimiento, seguridad en el uso y cantidad de operaciones. Los dispositivos y equipos electrónicos se utilizan en áreas de recepción de materiales, almacén, producción y embarque, por lo que están expuestos a factores ambientales de exteriores e interiores. Las variables mencionadas anteriormente, indican la confiabilidad de los sistemas electrónicos que algunas veces es afectada por

atmósferas interiores contaminadas por sulfuros y cloruros principalmente. Estos contaminantes provienen de fuentes externas como el parque vehicular, actividades de plantas industriales, campos geotérmicos, polvo que contiene partículas finas y gruesas y microorganismos. La adsorción de contaminantes del aire en conexiones y conectores eléctricos de equipos industriales origina fallas eléctricas y una disminución en su rendimiento operativo (Oesh, 1997; Sereda, 1996). El rechazo de un producto por no cumplir los requisitos de funcionalidad especificados, es considerado como una falla que conlleva a un costo no previsto en el inicio del proceso, siendo importante en la satisfacción del cliente y su seguridad, que es parte de la microelectrónica. Los proyectos de investigación deben generar información necesaria para adecuar los sistemas electrónicos a los ambientes en cada región, tomando en cuenta básicamente parámetros de clima, contaminantes del aire y sus fuentes de emisión, orografía de la ciudad y rendimiento operativo de equipos industriales. Es necesario proteger a los sistemas electrónicos de ambientes agresivos para evitar un bajo rendimiento productivo, sobrecalentamiento y sobretensión. Para conocer los métodos y técnicas de protección de los metales usados en la industria electrónica, es necesario saber las especificaciones y diseño del producto, material a utilizar, metodología de prueba en laboratorio y planta y condiciones ambientales a las que estará expuesto el producto (ASTM, 2001; White, 1996). Existen normas que apoyan a proteger a los equipos electrónicos, como la European Telecommunications Standard (ETS), aplicada a los análisis de ambientes a los que se exponen los sistemas de telecomunicaciones, así como otras normas que a continuación se especifican:

a. Norma ISO 9223. Analiza y clasifica los niveles de corrosividad en condiciones de interior y exterior, así como el proceso de corrosión en metales como acero al carbono, aluminio, cobre y zinc, expresadas en pérdida de masa de los metales mencionados en un periodo de exposición de un año.

b. Norma IEC 654-4. Evalúa y clasifica las condiciones de interior y exterior en base al grosor de la capa de óxidos formada en superficies metálicas de cobre al exponerse a un periodo de 30 días.

c. Norma ISA S71.04. Clasifica las condiciones de interior y exterior en equipos electrónicos que contienen cobre, de acuerdo al espesor de películas formadas en el material mencionado, en periodos de exposición de 30 días.

Al ser el cobre un metal muy utilizado en equipos electrónicos y buscar protegerlo de ambientes agresivos, por medio de las tres normas, existe una relación entre ellas, por lo que en ocasiones se puede utilizar algunas en particular o todas a la vez y de la ASTM American Standard for Testing Materials (ASTM). Ver ANEXO B

2.3.1 Calidad del ambiente en interiores.

Las variaciones de clima y la calidad del aire en los interiores, son factores importantes en la funcionalidad de los equipos electrónicos durante su producción. Los climas y atmósferas controlados contribuyen a la eficiencia productiva de máquinas industriales en una empresa, pero en aquellas donde no se tiene control de los microclimas, los niveles de humedad y temperatura varían a tal grado que se incrementan o disminuyen los índices climáticos. Esto origina la formación de películas húmedas o procesos de oxidación en metales (Morcillo, 1996). Un ejemplo es la cantidad de calor generado por la unión

intermetálica, radiación solar y temperatura del ambiente al que se expone una conexión o conector eléctrico. El calor resultante aunado al O₂, adsorción o desorción de humedad y solventes y contaminantes del aire originan corrosión y deterioro que facilitan la pérdida de algunas de sus principales propiedades fisicoquímicas: disminución del tiempo de vida, alteración dimensional y desgaste mecánico; modificando las características eléctricas de los materiales metálicos; cada modificación de sus propiedades genera una falla diferente, por lo cual se analizan los diferentes factores que causan y originan una resistividad eléctrica en equipos electrónicos.

2.3.2 Efecto de parámetros ambientales en la operación de equipos electrónicos.

Los análisis de parámetros ambientales se realizan en condiciones de interior específicas y con las condiciones estimadas a las cuales operarán los dispositivos y equipos electrónicos, realizándose algunos ensayos experimentales que determinan su eficiencia productiva:

- a. Evaluación de funcionalidad.** Se analizan las propiedades fisicoquímicas de los materiales utilizados en dispositivos y equipos electrónicos, para conocer si son susceptibles ambientes agresivos, y saber cuáles métodos y técnicas de protección deben utilizarse para aumentar/incrementar su tiempo de vida.
- b. Desempeño operativo.** Evalúa el rendimiento operativo de los dispositivos y equipos electrónicos en condiciones ambientales específicas a las que serán sometidos.
- c. Confiabilidad.** Analizar la selección de los materiales más adecuados para prevenir el rápido deterioro de éstos, y evitar fallas eléctricas en equipos electrónicos.

Estos tres tipos de ensayos proporcionan información de las características requeridas de los metales usados en la industria electrónica, determinando cuál de ellos puede ser utilizado para cada aplicación y ambientes requeridos (Ponchack, 2004).

2.3.3 Pruebas de operatividad de equipos electrónicos de la industria.

Para conocer con más detalle el rendimiento operativo de equipos industriales se realizan dos análisis experimentales:

1. Evaluación en ambientes naturales. Se desarrolla en las plantas industriales donde están instalados los equipos electrónicos obteniendo información precisa, solo que requiere de largos periodos de exposición. Por lo rápido que cambia la tecnología, en ocasiones estos ensayos no son adecuados para sistemas del área de electrónica, porque no se cumple el tiempo reglamentario.

2. Evaluación simulada. Ocurre cuando se exponen dispositivos y equipos electrónicos a ambientes simulados, de acuerdo a las características de clima y concentración de contaminantes del aire diseñados artificialmente similares a los naturales donde estarán operando. Para este tipo de evaluación, se consideran periodos continuos y periódicos, a diferentes tipos de climas e índices de contaminación, para saber que tanto varían los parámetros eléctricos con respecto a sus niveles normales. Además se aplican valores con sus límites de tolerancia y se evalúa el rendimiento operativo de equipos electrónicos.

La información recopilada mediante tablas y gráficos de ensayos experimentales es muy importante, porque se obtiene el grado de deterioro de los materiales metálicos usados en la industria electrónica con respecto a un tiempo específico de exposición.

2.3.4 Causas que influyen en fallas eléctricas de equipos electrónicos.

Para conocer que tan grave son las consecuencias del daño sufrido por materiales metálicos usados en conectores y conexiones eléctricas, se evalúan los tipos de fallas, la periodicidad de ocurrencia de estas, además de manera visual y con aparatos especializados el grado de deterioro de los metales y si existe actividad aeróbica o anaeróbica (Protopopoff, 2003; Rice, 1998). La información de fallas eléctricas se ordena en tablas y gráficos en periodos de tiempo. Algunos científicos mencionan en sus investigaciones que los principales mecanismos que originan fallas eléctricas en equipos electrónicos son:

- a. Transporte de masa de gases, partículas contaminantes y aireación.
- b. Procesos de absorción, adsorción y acidez.
- c. Fisicoquímica y actividad de electrolitos e iones.
- d. Proceso de crecimiento de la película formada en el metal de agentes corrosivos.
- e. Factores eléctricos, mecánicos y térmicos, formación de acoples galvánicos, afinidad química de sustancias depositadas en metales y falta de aislamiento eléctrico.

2.4 Análisis del clima de Mexicali.

El clima y orografía de Mexicali son factores importantes en la dispersión de los principales contaminantes del aire como el CO, NO_x, O₃ y SO₂ que se monitorean en esta ciudad, ocasionando que en ciertos periodos estacionales sobrepasan las normas estándares, y originan climas agresivos en interiores de la industria electrónica. El factor clima es importante en el rendimiento operacional de equipos electrónicos en el interior de plantas industriales instaladas en la ciudad de Mexicali. Los niveles de humedad

relativa de esta ciudad oscilan entre los 50% a 90% y con rangos de temperatura cercanos a los 0° C y mayor a los 45° C (García ,2003). Estos cambios climáticos, modifican las condiciones ambientales del exterior e interior de la industria electrónica, contribuyendo al deterioro de los materiales. La mayoría de los equipos electrónicos usados en condiciones de interior, sufren de algún daño por los ambientes agresivos que originan la corrosión en conectores y conexiones eléctricas. El polvo y las sustancias químicas de los ambientes interiores, se adhieren a componentes de equipos electrónicos, como computadoras, instrumentos de medición y máquinas industriales (figura 2.1). Un equipo opera adecuadamente cuando está libre de contaminantes y en microclimas controlados (Nishikata et al, 1995). A nivel mundial, las empresas manufactureras usan equipos electrónicos con parámetros de conductividad eléctrica rigurosos, que si son modificados, su rendimiento operativo no es el adecuado. En los periodos del año cuando los índices de humedad relativa y temperatura son mayores al 70% y 35° C, y por la presencia de partículas contaminantes en el interior de plantas industriales, se incrementa la cantidad de fallas eléctricas.



Figura 2.1. Equipo electrónico contaminado con polvo.

2.4.1 Influencia del tiempo de humectación.

El tiempo de humectación (TH por sus siglas en español y TOW, por sus siglas en inglés), es el tiempo en el cual una superficie metálica permanece lo suficientemente húmeda, para que se origine el fenómeno de corrosión. Las condiciones de TH se dan a valores de humedad relativa y temperaturas mayores a 80% (humedad crítica) y 0° C respectivamente, información que puede ser obtenida de las EMM (Estaciones de Monitoreo Meteorológico) del exterior. El tiempo de humectación es fundamental para determinar la velocidad de corrosión. Para evaluar las categorías del tiempo de humectación por niveles, se aplica el estándar ISO 9223 (ISO 9223, 1992), el cual está también relacionado con la contribución de contaminantes como cloruros, sulfatos y los índices de corrosividad para el acero al carbono, aluminio y cobre (Tabla 2.1). En ocasiones durante el proceso de corrosión se generan fracturas o picaduras en el metal, que originan fallas mecánicas y eléctricas (Corvo et al, 1997).

Tabla 2.1. Nivel de categorías del tiempo de humectación en metales.

TH (horas / año) > 80% y T > 0 C TH- Tiempo de Humectación	Categorías
TH ≤ 10	T ₁
10 < TH ≤ 250	T ₂
250 < TH ≤ 2500	T ₃
2500 < TH ≤ 5500	T ₄
5500 < TH	T ₅

2.5 Contaminación del aire.

La presencia de contaminantes del aire en exteriores e interiores, influenciada por varios factores, tiene un efecto negativo en los materiales metálicos. Estos factores incluyen

emisiones de fuentes antropogénicas (Figura 2.2) y naturales de procesos en interiores y exteriores, condiciones meteorológicas y de ventilación; así como los procesos de degradación y eliminación los contaminantes. En las plantas industriales existe una gran diversidad de metales usados en el interior (Cole et al, 1998), de manera que la distribución de las aéreas de manufactura, sus superficies y ventilación son consideraciones importantes cuando se evalúa la exposición a la contaminación del aire. La calidad del aire del exterior es un reflejo de la calidad del aire de los interiores.



Figura 2.2. Fuentes antropogénicas de contaminación del aire de automóviles e industrias.

Se han desarrollado diversos métodos para mediciones del aire en condiciones de interior, indicando que los sulfuros y cloruros, aunados a las variaciones de humedad y temperatura, son los principales factores de la generación de ambientes agresivos en el interior de plantas industriales que originan la corrosión en materiales metálicos. Los sulfuros procedentes del exterior, penetran por rendijas, orificios y sistemas de aire acondicionado, mientras que los cloruros provienen de aerosoles en el ambiente, además

de partículas formadas por actividades de limpieza en superficies y baños de plantas industriales y vapores de fundentes de los procesos de soldadura. Las operaciones de hornos industriales, emanaciones procedentes de materiales para construcción y procesos químicos, son menos significativos en la agresividad del ambiente de interior (Cole et al, 1998). Para poder determinar con mayor precisión la acumulación de contaminantes con sus principales factores de emisión y dispersión en el interior, se esquematiza un balance que se muestra en la figura 2.3. Como se puede observar el resultado global del balance es una acumulación, por lo que se espera al final un ambiente interior contaminado.

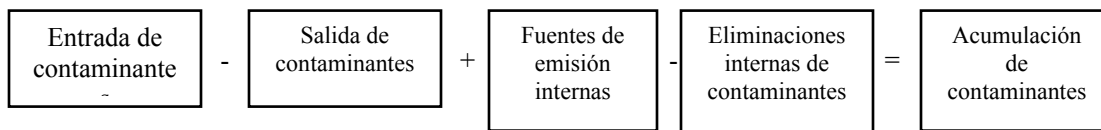


Figura 2.3. Balance de materia para el análisis cuantitativo de la calidad del aire en interiores.

El flujo de contaminantes se debe tanto a la infiltración del aire exterior como a la recirculación. Si se obtienen valores apropiados con los equipos especializados en todas las etapas del balance de energía, se pueden estimar las concentraciones de interior para diferentes procesos industriales. Con ello se puede prevenir la generación de ambientes agresivos con la reducción y en ciertas áreas de interiores, la eliminación de los principales contaminantes del aire, que en conjunto con los parámetros de humedad y temperatura originan la corrosión en los metales (ANEXO C. Contaminantes del aire: polución y corrosión). Los contaminantes del aire monitoreado en la ciudad de Mexicali Estaciones de Monitoreo Ambiental (EMA) y portátil:

a) Ácido sulfhídrico (H₂S). Es un gas tóxico y flamable, con un olor desagradable a huevos podridos y genera rápidamente un daño a los materiales metálicos aún a bajas concentraciones que origina sulfuración. Las fuentes de emisión de este gas se originan

en el campo geotérmico de Cerro Prieto, quema de combustibles y lagunas de oxidación en plantas de tratamientos de aguas negras, donde la materia orgánica es sometida a procesos de descomposición (animal o vegetal), **generando corrosión por** . Su reacción química típica de formación de H₂S, es la siguiente:



b) Bióxido de azufre (SO₂). Es un producto de la combustión de compuestos del azufre, en los combustibles que afecta en gran medida a los ambientes exterior e interior de plantas industriales. En la ciudad de Mexicali la principal fuente de emisión de este contaminante es el parque vehicular. La oxidación del SO₂ en presencia de NO₂ genera H₂SO₄, siendo entonces promotor del fenómeno de la lluvia acida



c) Monóxido de carbono (CO). Es un compuesto químico inodoro e incoloro, producido por la combustión incompleta de compuestos de carbón (C), en plantas industriales y automóviles, como se expresa:



d) Óxidos de Nitrógeno (NO_x). Es un grupo de gases reactivos que contiene nitrógeno y oxígeno en diferentes cantidades, que son incoloros e inodoros. Un compuesto particular de este grupo es el bióxido de nitrógeno (NO₂) proveniente de automóviles que es la

fuente de emisión mayor, además de las provenientes de actividades comerciales, domésticas e industriales, donde se queman combustibles fósiles. Un ejemplo es el NO₂, formado en la presencia de ozono y óxido nitroso:



e) Ozono (O₃). Es un contaminante del aire proveniente de reacciones químicas que se generan en el aire y producido por sistemas eléctricos. A cierta altura de la superficie terrestre forma una capa que no permite el paso de los rayos del sol que producen mayor radiación solar y con ello temperaturas elevadas. En algunas zonas del mundo esta capa se está deformando por la interacción con otro tipo de gases contaminantes. Se forma entre otras por las siguientes reacciones:



2.5.1 Calidad del aire en Mexicali.

Los índices de contaminación son evaluados según la normatividad de estándares que indican los niveles de concentración regulados por instituciones del medio ambiente en cada país. En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), en conjunto con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) son las encargadas de regular las emisiones de contaminación. Con acuerdos internacionales, en la frontera de México y Estados Unidos, la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés), ha instalado EMA, cuyos resultados que en

conjunto con los de las EMM, permiten elaborar un análisis que muestra índices de contaminación, humedad relativa y temperatura por periodos estacionales (Figura 2.4).



(a) (b)
Figura 2.4. Estaciones de monitoreo: (a) ambiental y (b) meteorológico.

Los contaminantes del aire exterior que penetran hacia el interior de empresas, monitoreados en esta ciudad son el SO_2 , CO , NO_x , O_3 y partículas en suspensión reportados por la National Ambient Air Quality Standards (NAAQS, 2006). Además se generan compuestos orgánicos volátiles en interiores u otros como el amoniaco que es inorgánico, y aun a bajas concentraciones, tienen un efecto significativo en el fenómeno de corrosión.

Las ciudades fronterizas han llegado a acuerdos para proteger el medio ambiente regional, desarrollando normas para obtener información de los contaminantes mencionados anteriormente. Cada contaminante del aire se expresa en unidades de microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en partes por millón (ppm) siendo aplicados en análisis de correlación con los factores climáticos (Tabla 2.2). Los índices de calidad del aire para cada contaminante, son propuestos de acuerdo a experimentos elaborados, obteniendo el grado de deterioro de los materiales.

Tabla 2.2. Estándares de calidad del aire en la frontera de México y Estados Unidos.

Contaminante	Tiempo promedio	Concentración (máximo)
Bióxido de azufre (SO_2)	1 Hora	0.04 ppm
Bióxido de nitrógeno (NO_2)	1 hora	0.25 ppm
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	9 ppm
Ozono (O_3)	1 hora	0.25 ppm
Partículas menores de 10 micras (PM_{10})	8 horas	9 ppm
Partículas menores de 2.5 micras ($\text{PM}_{2.5}$)	30 días	$1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Plomo (Pb)	30 días	$1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente. Environmental Protection Agency (EPA-USA). State and National Ambient Air Quality Standards

2.6 Fundamentos de corrosión.

La corrosión es el deterioro de materiales metálicos por la exposición de estos al medio ambiente que los rodea (Fontana, 1986), donde se forman agentes oxidantes y reductores. La combinación de la humedad y la temperatura es un factor importante en la generación de corrosión (Jones, 1996), ya que a niveles de humedad y temperatura mayores de 70% y 35° C, y en presencia de ciertos contaminantes del aire se inicia un proceso de electroquímico de corrosión o corrosión húmeda. La corrosión puede ser también un proceso en ausencia de humedad o corrosión seca o de alta temperatura donde no requiere de electrolito. Esto genera un cambio de valencia más alta en el estado de oxidación de metales activos que se deterioran más rápido por efectos de la corrosión. En el caso de la intervención de agentes contaminantes, la corrosión se origina por la reacción química de la exposición de materiales metálicos principalmente a cloruros, sulfuros, SO_x, NO_x, amoníaco, compuestos orgánicos, etc. El uso de los materiales metálicos en diversas actividades industriales, depende de la manera en que se utilizará y las condiciones ambientales a las que estará expuesto. En el proceso de uso y formación de aleaciones, los metales experimentan modificaciones que hacen variar sus propiedades fisicoquímicas, ocasionando que ocurra deterioro en éstos, por la corrosión.

2.6.1 Costos generados por la corrosión.

El fenómeno de corrosión (oxidación-reducción) que se presenta en materiales metálicos usados en la industria electrónica, origina pérdidas económicas. Debido a esto, se requieren métodos y técnicas de protección que ayudan a evitar la corrosión, pero esto hace que se incrementen los costos en el proceso de fabricación de artículos electrónicos.

El uso de recubrimientos e inhibidores de corrosión en fase vapor en superficies metálicas de equipos electrónicos, previenen y controlan el fenómeno de corrosión, incrementando su eficiencia operativa, pero aumentan los costos de mantenimiento. El decremento productivo de una empresa, ocurre básicamente por las veces en que se interrumpe la producción al ocurrir una falla eléctrica y/o es necesario reemplazar partes de un equipo electrónico, productos defectuosos y gastos por el desarrollo de investigaciones para prevenir y controlar la corrosión. Los costos se clasifican en: directos, como la reposición de piezas de equipos electrónicos e indirectos como la interrupción de la producción y pérdida o reparación del producto, ocurriendo a temperaturas elevadas sin dar oportunidad de que se forme la película de humedad:



Cuando se forman películas de humedad, ocurre la corrosión electroquímica por conductividad electrolítica, generando celdas electroquímicas, disolviéndose el metal en el ánodo mientras otras se reducen en el cátodo. En la zona anódica, el metal se disuelve conforme la siguiente reacción química:



Siendo M el material metálico y n el numero de electrones con su carga eléctrica, que participan en la reacción. En la zona catódica se pueden presentar varias reacciones, siendo una de las más importantes, la siguiente



que es una descarga de hidrógeno en medios ácidos y en medios con poca aireación se tiene



siendo la reducción del oxígeno disuelto en agua para formar iones OH^- .

Para que ocurra la corrosión, deben de formarse el ánodo y el cátodo, sin importar la distancia entre ellos, siendo espontáneo el proceso, generando un potencial eléctrico y originando una fuerza electromotriz entre ellos. El fenómeno de corrosión se identifica por el ataque que se presenta en el material metálico, dependiendo de factores ambientales, estructura del metal, metalográficos y mecánicos. Otra manera de describir el proceso de corrosión es por las causas de mecanismos físico-químicos, factores mecánicos y medios corrosivos. Algunas causas de mecanismos, son la aireación diferencial, corriente eléctrica medida por un amperímetro, galvánica y fragilización por hidrógeno. La aireación diferencial ocurre en zonas donde el metal se expone a diferentes velocidades y flujos de aire, siendo el oxígeno el principal elemento que interviene, correspondiendo a la zona anódica la menos mas aireada y la catódica la de mayor aireación. Los materiales metálicos están expuestos a varios factores, como el esfuerzo mecánico, contaminación del aire y cambios climáticos, por lo que se origina corrosión por fatiga, tensión y corrosión-erosión, que son los principales tipos de corrosión en los que se involucran factores mecánicos. Respecto al medio en que se ponen los metales de equipos electrónicos, podrán clasificarse los tipos de corrosión que puedan ocurrir, siendo la más frecuente la corrosión atmosférica. Donde la humedad y temperatura son factores importantes, porque de ellos depende la formación la película electrolítica y la promoción del fenómeno de corrosión.

2.6.2 Velocidad de corrosión.

Para determinar el grado de deterioro que sufre un material metálico, es necesario conocer la velocidad de corrosión de éstos, teniendo básicamente tres métodos:

a. Pérdida de peso. Es también llamada diferencia de peso de un material metálico y se obtiene por la relación del peso inicial y final de un metal expuesto en un ambiente y periodo de exposición determinados. Su unidad básica es $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$, que significa la cantidad de peso que pierde un material metálico respecto a su área expuesta en un año.

b. Penetración del material. Evalúa el deterioro a partir de la variación del espesor que sufre el material metálico en un periodo de exposición determinado, siendo sus principales unidades $\text{mm}/\text{año}$ o $\text{milipulgadas}/\text{año}$.

c. Análisis de densidad de corriente. Se usa con una técnica de evaluación electroquímica, donde se analiza la cantidad de corriente que fluye en el metal, de acuerdo a una serie de fuerza electromotriz y galvánica, y su cálculo teórico tiene una ecuación matemática:

$$m = \frac{I \cdot M \cdot t}{n \cdot F} \quad (14)$$

donde

I = Intensidad de corriente que fluye por el electrodo (Amperios).

M = Masa atómica del material (miligramos).

t = Tiempo en el cual fluye la corriente (segundos).

n = Número de electrones que participan en la reacción electroquímica.

F = Constante de Faraday ($96\,500 \text{ C/mol}$), proviene de las Leyes de Faraday.

El área de exposición es determinante para conocer la densidad de corriente (i) que se expresa en $i = I/A$, y es muy utilizada en laboratorios de investigación. Modificando la ecuación anterior obtenemos:

Como $i = I / A$, tenemos, $I = i \cdot A$. y se aplica en la ecuación

14, quedando de la siguiente manera:

$$m = \frac{i \cdot A \cdot M \cdot t}{n \cdot F}$$

Para obtener la ecuación de densidad de corriente (i):

$$i = \frac{m. n. F.}{M. A. t.} \quad (15)$$

2.7 Control de la corrosión.

Para prevenir y controlar la corrosión es necesario conocer las características del material metálico y los ambientes a los que es expuesto. A veces es mejor económicamente, reemplazar las partes corroídas, en lugar de usar métodos de protección y control (ANEXO D. Métodos de protección contra la corrosión), pero en otros casos, se deben utilizar técnicas y métodos como los que se explican:

a. Selección de materiales. La elección de un material resistente a la corrosión es la manera más básica de prevenirla, conociendo los ambientes a los que será expuesto, costos, propiedades y si puede estar en contacto con otro material. Una preocupación de los investigadores de corrosión en metales, es obtener aleaciones metálicas que resistan altas temperaturas, acoplarse fácilmente para implantes médicos y aumentar su pureza.

b. Recubrimientos. Es necesario recubrir ciertos materiales metálicos usados en la industria electrónica, para que tengan buena resistencia a la corrosión. Los recubrimientos pueden ser metálicos, aplicados en películas delgadas para aislar a los metales, considerando su potencial electroquímico y el ambiente al que se expone. Otro tipo de recubrimientos son los orgánicos, en forma de barnices, pinturas, lacas y polímeros que ayudan a proteger a los metales de los ambientes corrosivos, que se aplican en superficies preparadas, de lo contrario no tendrá la eficiencia requerida. La capa de vidrio que se adhiere a los aceros, es un ejemplo de recubrimiento inorgánico, que hace más resistente al acero para ser utilizado para almacenar sustancias químicas. Los inhibidores de corrosión fase vapor, tratamiento por láser y compuestos cerámicos son otros tipos de recubrimientos inorgánicos.

c. Diseño. Es importante fabricar estructuras con niveles de angulación requeridos que no permitan la acumulación de agua, penetración de contaminantes del aire o aireación inadecuadas. Cuando se diseña con las características mencionadas, es poco probable que se genere corrosión y la velocidad deterioro de los materiales metálicos es lenta. Además se debe considerar los metales que pueden unirse sin formar pares galvánicos.

d. Protección electroquímica. Se usa para detener o reducir la corrosión mediante la formación de un par galvánico, suministrando un flujo de electrones continuamente en el ánodo, para evitar que se disuelva. A este proceso se le llama protección catódica y se desarrolla de dos maneras: la primera es unir la pieza a proteger a un polo negativo de una corriente externa por medio de un rectificador a la fuente eléctrica (protección catódica por corriente impresa) y la otra es con un acoplamiento galvánico entre la estructura a proteger y otro metal más activo que funge como ánodo (magnesio, zinc, aluminio, etc.). A este proceso se le conoce como protección catódica por ánodo de sacrificio.

2.7.1 Corrosión en zonas áridas o semidesérticas.

La mayoría de los estudios de corrosión de materiales metálicos se han desarrollado en zonas tropicales donde el ambiente marino con la presencia de cloruros, deterioran a los metales usados en la industria electrónica. Pocos estudios se han elaborado en zonas áridas o semidesérticas donde es necesario considerar los niveles de humedad y temperatura, así como la orografía de la región a analizar, por la facilidad o dificultad de dispersión de los contaminantes del aire. En algunos periodos del año en estas zonas como el caso de la ciudad de Mexicali, los niveles de humedad y temperatura son

mayores al 70% y 35° C, generando el tiempo de humectación que origina el proceso electroquímico de corrosión. Los contaminantes del aire dependerán de las fuentes de emisión presentes en ciudades ubicadas en estas zonas.

2.8 Clasificación de la corrosión.

El fenómeno de corrosión puede ser de dos tipos: **(1)** por un mecanismo químico o **(2)** electroquímico. En la corrosión seca o química, no es necesario un electrolito como el agua o una solución alcalina, originando una reacción química entre el metal y su medio ambiente, por ejemplo cuando un material metálico se combina con el oxígeno, se generan óxidos. La corrosión se clasifica según las categorías de baja y alta temperatura, por oxidación seca (química) y húmeda (electroquímica) (Stupnisek-Lisac, 1999). Según su origen se conocen cuatro principales formas de corrosión:

a. Corrosión uniforme. Se desarrolla en toda la superficie metálica, originada por la presencia de agua y gases contaminantes, como por ejemplo las estructuras de acero expuestas a orillas de las playas, por la alta concentración de sales. Cuando el acero se oxida, forma herrumbre (Figura 2.5). Algunos métodos que ayudan a proteger a los metales por este tipo de corrosión, son los procesos de pintado y uso de recubrimientos, además de materiales más resistentes de corrosión como aleaciones de acero con níquel, cromo o molibdeno.

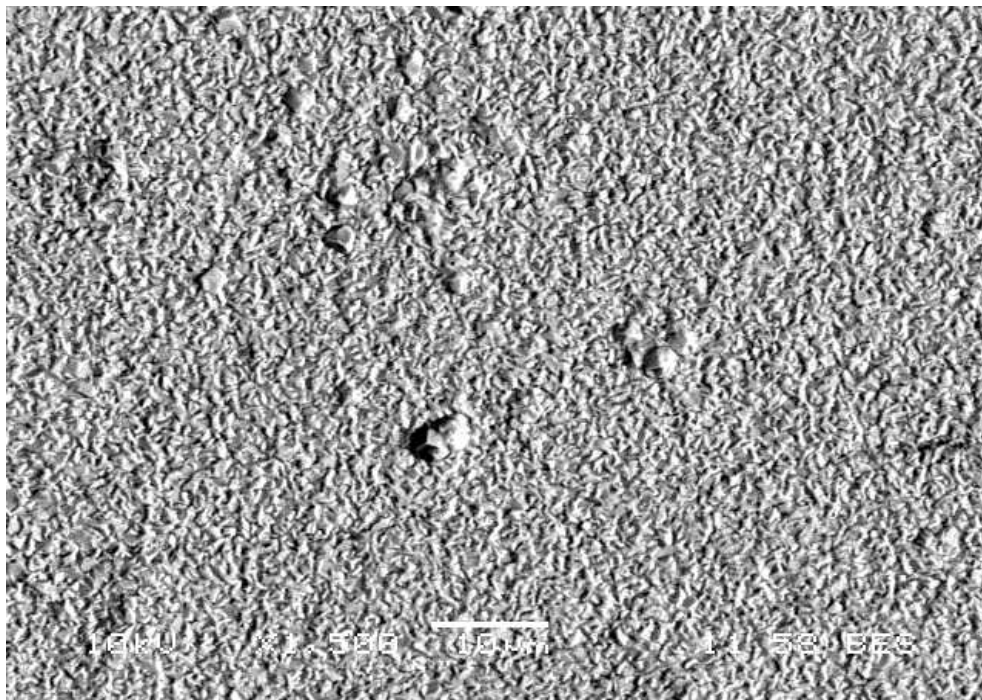


Figura 2.5. Corrosión uniforme en probeta de cobre.
Laboratorio de Corrosión y Materiales, Instituto de Ingeniería-UABC.

Un factor importante que origina un retardo de corrosión en el acero es que al exponerse en ambientes corrosivos, se forma una película de óxido en la superficie metálica, la cual impide que se desarrolle el proceso electroquímico por falta de una superficie reactiva. Este tipo de corrosión es por sólidos húmedos, por formación de celdas electrolíticas y electroquímicas, generando concentración de iones metálicos.

b. Corrosión galvánica. La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes con potenciales distintos, se encuentran en contacto eléctrico y en presencia de un electrolito. Esta disimilaridad o acople galvánico, origina una diferencia de potencial que genera un flujo de corriente eléctrica a través del metal corroído en un circuito que se cierra con el electrolito. Al existir este potencial ocurre el proceso de corrosión galvánica, causando el deterioro de uno de los dos metales por corrosión anódica y catódica por la fuerza electromotriz presente en el acople galvánico. El metal con menor resistencia a la

corrosión, que es más activo es la zona anódica, y el de mayor resistencia es el metal noble o menos activo, es la zona catódica, siendo el que se protege (Figura 2.6).



Figura 2.6. Corrosión galvánica en la cabeza de un tornillo de acero inoxidable sujeto a una lámina de aluminio.

Fuente. <http://corrosion.ksc.nasa.gov/galcorr.htm>

El análisis de la corrosión galvánica es importante para el diseño y selección de materiales de los equipos electrónicos usados en interiores de plantas industriales, debido a que los materiales diferentes forman celdas galvánicas que originan la corrosión. Se toma en cuenta la estructura del diseño, además de cómo se forman las uniones y el tipo de metal seleccionado, para evitar la presencia de humedad en la unión de los metales. En algunas ocasiones la corrosión galvánica actúa como una ayuda en ciertas aplicaciones, debido a que se corroe uno de los metales y protege al otro, como por ejemplo la unión del acero y el zinc, donde este último se corroe siendo el ánodo y protege al acero que es el cátodo, ocurriendo el proceso de corrosión a una velocidad mas lenta que el metal que

es considerado el ánodo. El metal que se protege es el cátodo y el corroído es el ánodo de sacrificio (Virmani, 2006; Tahara, 2005).

c. Corrosión de fractura por esfuerzo. Uno de los problemas más serios de la metalurgia y de mayor preocupación en plantas industriales es la corrosión de fractura por esfuerzo. Es un tipo de ataque corrosivo intergranular que ocurre en los límites de grano cuando existe esfuerzo por tensión (Figura 2.7). La fractura tiende a propagarse por el metal, haciéndolo débil y ocasionando fallas mecánicas y eléctricas. Las fracturas siguen rutas intergranulares o transgranulares, siendo una ruptura ramificada. Las fracturas de este tipo tienden a propagarse en ángulo recto, en la dirección de la fuerza de tensión y niveles de estrés menores necesarios para materiales en ausencia de ambientes corrosivos.

Como una ruptura penetra al interior del material y en ocasiones es difícil observarla a simple vista, reduce sus características de resistencia estructural y con ello se presentan las fallas. Las causas de una fractura por esfuerzo (fractura frágil) son entre otros el trabajo en frío, procesos de soldadura en tableros electrónicos a altas temperaturas, esfuerzo constante, tratamiento térmico, procesos de expansión y contracción del material. Una forma de esta corrosión es la originada por el hidrógeno, que se acumula en la estructura interna del material formando ampollas, que fragilizan al metal disminuyendo sus propiedades mecánicas y haciéndolo más susceptible a fallar. El estrés operativo origina fragilización.



Figura 2.7. Corrosión por esfuerzo en acero al carbono con grietas ramificadas.
Fuente. <http://corrosion.ksc.nasa.gov/stresscor.htm>

- d. Corrosión localizada.** Se origina solo en ciertas zonas o pequeñas áreas (celdas) localizadas donde se concentran los agentes agresivos en presencia de humedad, ocasionando que se deteriore el material. También ocurre cuando algunas pequeñas zonas son afectadas por celdas de distinta concentración de agentes corrosivos entre un punto y otro del metal, formándose electrodos por los electrolitos presentes en la corrosión clasificada como sigue:
- **Corrosión por hendiduras.** Originada en áreas específicas donde se tienen uniones lineales y angulares de metales, además en pequeños estancamientos causados por orificios o hendiduras de metales (Figura 2.8). La corrosión filiforme, que ocurre cuando en la estructura interna de los materiales se desintegra formando filamentos

metálicos, se considera dentro de este tipo, donde se evalúa el rompimiento de potencial, para detectar el inicio de una hendidura o en análisis de picaduras en metal.

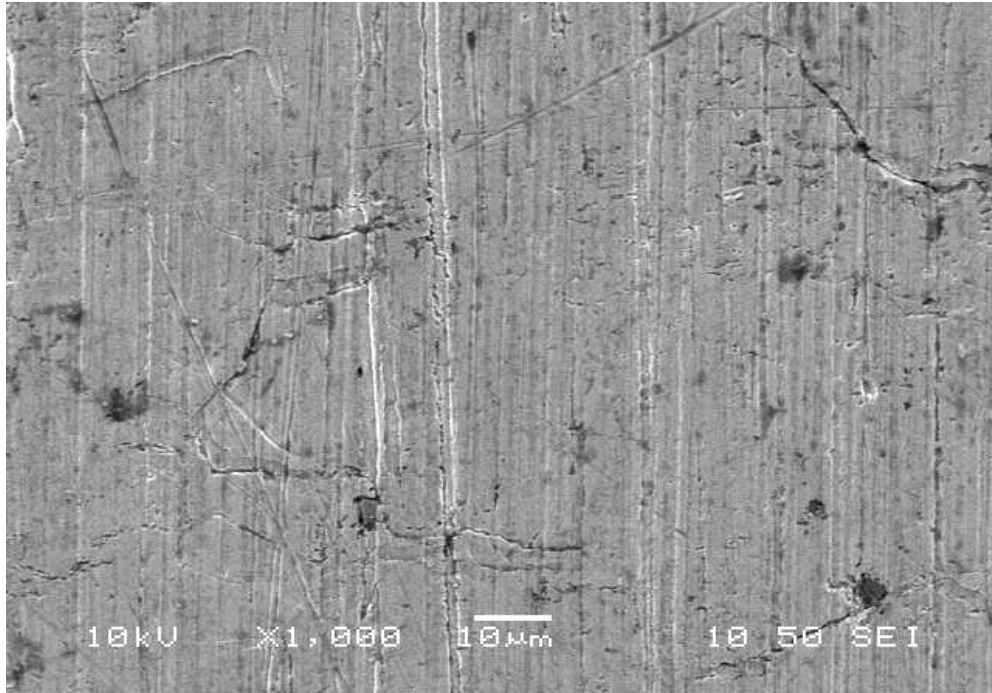


Figura 2.8. Corrosión por hendiduras en probeta de estaño.
Laboratorio de Corrosión y Materiales, Instituto de Ingeniería-UABC.

- **Corrosión por picaduras.** Generada por picaduras que forman orificios de un metal, y de diámetro pequeño o grande. Las picaduras se consideran como una cavidad u orificio, siendo muy destructiva y difícil de monitorear (Figura 2.9). Es importante conocer el factor de cavidad en el cual se conoce el efecto dañino de este tipo de corrosión que es difícil detectarla al inicio de su proceso, causando severos daños a las instalaciones y equipos electrónicos. Una forma de detectar el inicio de la picadura es medir el potencial crítico en un área determinada.

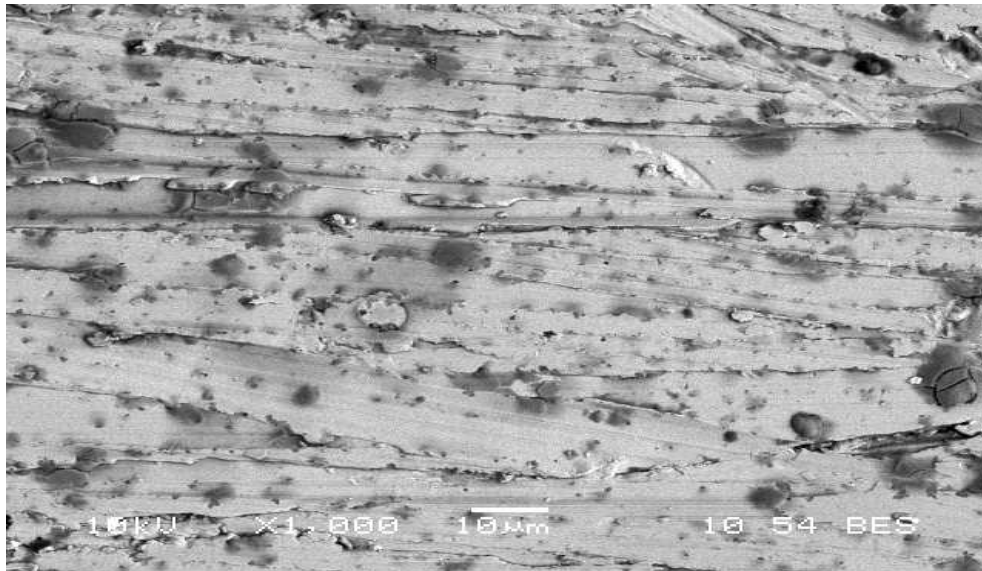


Figura 2.9. Corrosión por picaduras en probeta de níquel.
Laboratorio de Corrosión y Materiales, Instituto de Ingeniería-UABC.

- **Corrosión intergranular.** Ocurre en los límites de grano de las estructuras que se generan al formarse el material, siendo un tipo de ésta, la corrosión por exfoliación (Figura 2.10). También se forma una ruta transgranular, que ocurre en el interior de los granos, ocasionando las fracturas que modifican las propiedades mecánicas del metal y con ello fallas eléctricas.



Figura 2.10. Corrosión por exfoliación en tanque de acero inoxidable aleado con aluminio.
Fuente. <http://corrosion.ksc.nasa.gov/intercor.htm>

- **Erosión-corrosión.** Aumenta la velocidad de corrosión en sistemas por donde circula un fluido con cierto contenido y tipo de sólidos que originan un deterioro en metales que están en contacto con el fluido, ocurriendo un proceso acelerado (Figura 2.11). El metal se elimina de la superficie en forma de iones o como productos de corrosión sólidos.



Figura 2.11. Erosión-corrosión en tanque de aluminio.
Fuente. <http://corrosion.ksc.nasa.gov/eroscor.htm>

2.8.1 Factores de corrosión.

Los átomos del metal son separados de sus elementos estructurales o se oxidan, ocasionando fallas y con ello consecuencias graves en los procesos industriales. Existen factores que no provienen directamente de la contaminación atmosférica, sino que empeoran las condiciones de calidad del aire. Esto se relaciona con decisiones de las autoridades como planes reguladores ambientales que se rigen por normas estandarizadas (Adler et al, 2005), expresadas a continuación:

a. Población. Las condiciones urbanas tienen un alto impacto en la contaminación de la atmósfera, incrementando la flota vehicular y con ello largas esperas en cruces viales, y originando la contaminación del aire por *smog*.

b. Actividades industriales. En las grandes urbes se encuentran instaladas industrias que se rigen por normas de contaminación, que en ciertos periodos del año generan altos índices de contaminación del aire que sobrepasan los estándares de calidad del aire y un esfuerzo mecánico operativo en materiales metálicos de equipos electrónicos.

c. Orografía regional. Es importante en cada región del mundo en la dispersión de los contaminantes del aire, siendo un factor que determina las zonas de mayor concentración de contaminantes del aire en cada ciudad.

d. Factor climatológico. Determina las condiciones de humedad, temperatura y flujo de **viento** de cada región. De acuerdo a cada época del año se presentan dos fenómenos como la inversión térmica que influye en el proceso de ascenso y descenso de partículas del aire inferior al superior por la diferencia de sus temperaturas y la ventilación, indicando la rapidez de dispersión de los contaminantes del aire en cada zona de la ciudad para conocer los efectos en los materiales. Los flujos de viento, variaciones de humedad y temperatura en los interiores de plantas industriales, originan la formación **de** celdas de aireación diferencial y los contaminantes del aire generan las celdas de concentración.

2.8.2 Importancia de la corrosión para la industria electrónica.

El deterioro que sufre un material metálico por la interacción al medio ambiente donde se expone, modifica sus propiedades físico-químicas y estructura, donde el pH es importante

en el proceso de corrosión. Ciertos metales presentan niveles de energía y de entropía que los hace termodinámicamente inestables y buscan su estabilidad, y es cuando ocurre el fenómeno de corrosión. Existen otros materiales metálicos tan estables en ambientes no muy agresivos que permanecen casi con las mismas propiedades y estructura sin modificarse durante largos periodos de tiempo. El gran auge en el uso de materiales metálicos en el siglo XX y en este nuevo siglo, por sus características de conductividad eléctrica y térmica, los hace ser confiables para utilizarlos en equipos electrónicos que desarrollan una gran infinidad de operaciones. La corrosión en metales preocupa a la comunidad científica y tecnológica, por los efectos negativos que ocasiona en la salud de los seres vivos, pérdidas económicas y daño al medio ambiente. Existen estudios que equiparan los costos de la corrosión con la construcción de grandes obras como el canal de Panamá y el Producto Interno Bruto (PIB) de los Estados Unidos. Desde que se inicio la fabricación de equipos electrónicos, el diseño de ingeniería se ha basado en las propiedades de los materiales metálicos, considerando su eficiencia en la conductividad eléctrica y térmica; y en los últimos años, por el rápido deterioro de ciertos metales, se ha tomado en cuenta la resistencia a la corrosión. La ocurrencia del fenómeno de corrosión en conectores y conexiones de equipos electrónicos, disminuye su rendimiento operativo y con ello un decremento en la productividad, por los costos de mantenimiento y reemplazo de partes eléctricas. En ocasiones, el daño al medio ambiente que origina la corrosión es irreversible y modifica las condiciones ambientales tanto en ambientes exteriores e interiores de plantas industriales. La corrosión generada por contaminación del aire, es en su mayoría de fuentes antropogénicas, básicamente de la combustión de vehículos, campos geotérmicos y empresas, cuyas emisiones en ocasiones, no son

reguladas por las normas estándares de calidad del aire. Los altos costos por la corrosión, preocupa a los analistas de este tema porque cada vez ocurre con mayor frecuencia. Algunos problemas ocasionados por este fenómeno, son el ocurrido con la estatua de la libertad en Nueva York en 1986, donde se invirtieron \$66 millones de dólares en su restauración y \$40 millones de dólares por la recuperación de 4000 de las 25000 torres del sistema eléctrico interconectado en Nueva Zelanda, por estar corroídas. La inoperatividad de equipos electrónicos en interiores de plantas industriales, disminución de calidad de productos por contaminación en materia prima y en éstos, además de gastos por las investigaciones en nuevos diseños; son factores que elevan los costos por la ocurrencia de corrosión que origina un envejecimiento del metal. Los materiales metálicos usados en la industria, son usados con gran frecuencia para la fabricación de dispositivos y componentes electrónicos, utilizados básicamente en equipos de suministro de energía eléctrica, electrodomésticos, médicos y de telecomunicaciones. Las principales fallas en estos equipos son por deterioro de conductores y conexiones eléctricas, así como **en** estructuras aislantes de equipos electrónicos que permiten la entrada de pequeñas partículas contaminantes y aunadas a variaciones de humedad y temperatura, originan la corrosión y las fallas eléctricas. La generación de corrosión en conectores y conexiones eléctricas, incrementan la resistencia eléctrica y con ello aumenta la temperatura de los dispositivos y componentes electrónicos, que origina fuga de corrientes eléctricas y cortocircuitos. Como todos los componentes están interconectados, al fallar alguno, se genera la falla eléctrica en el equipo electrónico.

2.8.3 Corrosión en equipos electrónicos.

Es muy estudiada por analistas de corrosión realizando pruebas de corrosión acelerada en metales usados en la industria electrónica, para evaluar las pérdidas económicas. Los principales tipos de corrosión en equipos electrónicos, son:

- a. **Corrosión uniforme.** Ocurre básicamente en el cobre y la plata de tableros electrónicos, éstos presentan manchas en el inicio y posteriormente se cubren totalmente con una capa de óxidos metálicos de manera uniforme, ocasionando que no se adhieran adecuadamente los componentes o se desintegren poco a poco.
- b. **Corrosión galvánica.** Se presenta cuando dos metales con potenciales diferentes están en contacto en presencia de un electrolito, originando una diferencia de potencial y un intercambio de electrones, siendo un metal el ánodo y otro el cátodo. La transferencia de carga eléctrica va de un metal a otro, por los potenciales eléctricos diferentes. Cerca de la unión metálica, se origina una corrosión localizada que ocasiona perforaciones en el metal que es el ánodo.
- c. **Corrosión electroquímica.** Es un proceso electroquímico espontáneo, donde se origina una diferencia de potencial, por los potenciales de los metales que están unidos. En ocasiones se presentan corrientes originadas por potenciales externos a la unión metálica. El gran auge de la miniaturización en dispositivos que usan cobre, ha originado preocupación por la ocurrencia de corrosión electrolítica en este metal, lo que ha motivado a científicos y técnicos de esta área en las dos últimas décadas, a estudiar los factores que la generan y proponer métodos y técnicas de protección. Si la cantidad del electrolito es grande y su composición permite que se formen especies

complejas, el ánodo se va a diluir y se va a liberar hidrógeno del cátodo, lo que va a deteriorar al cobre.

- d. Corrosión por picaduras.** Se desarrolla en áreas específicas de la superficie metálica, generando cavidades (también llamados ánodos) en forma de ángulos y con profundidades mayores a sus diámetros. Este proceso ocurre cuando el metal pierde su pasividad y se disuelve rápidamente, donde las picaduras dependen de la corrosión atmosférica y del potencial de oxidación de los metales.
- e. Corrosión por disolución selectiva.** Ocurre básicamente en uniones de cobre y zinc que forman el latón, donde se oxida el zinc, quedando residuos de cobre y productos de corrosión. Cuando ocurre la dezincificación localizada, se originan perforaciones en las uniones metálicas, y se genera como en componentes electrónicos de equipos de control instalados en vía pública, constituidos de latón con recubrimientos de níquel y plata, donde se presenta el efecto estufa.
- f. Corrosión microbiológicamente inducida.** Se presenta por la influencia de microorganismos como algas, bacterias y hongos y se genera en ambientes de interiores con las condiciones adecuadas de humedad y temperatura en los lugares donde están instalados equipos electrónicos (Figura 2.12). Al existir oxígeno, humedad y calor, ocurrirá la corrosión, siendo los equipos electrónicos muy propensos a sufrir algún daño por este fenómeno en contactos eléctricos con soldaduras en tableros electrónicos y en uniones metálicas, además de dispositivos de generación de energía y control como interruptores y circuitos integrados.

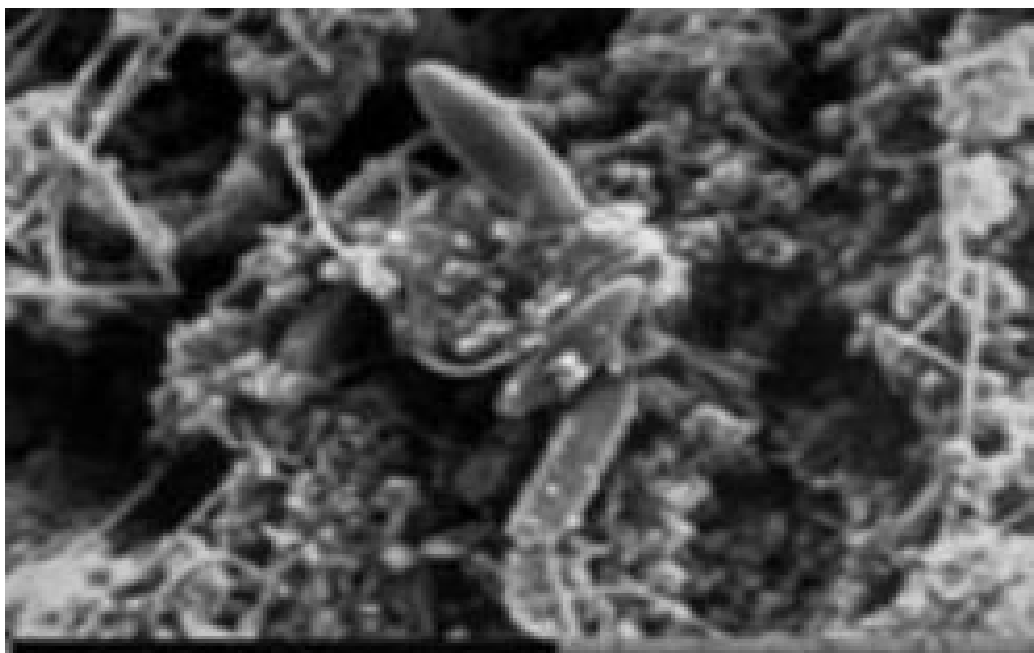


Figura 2.12. Corrosión microbiológica en cobre.
Fuente. <http://corrosion.ksc.nasa.gov/microbial.htm>

Los contaminantes del aire como el H_2S , $NaCl$, NO_x y SO_2 , son los que tienen un efecto mayor en la generación de corrosión en metales usados en la industria electrónica. El H_2S , y SO_2 , provienen de campos geotérmicos como el ubicado a 15 km. de Mexicali y quema de combustibles que contienen azufre. Los NO_x son emitidos por fuentes vehiculares y el $NaCl$ se incorpora a la atmósfera desde el mar, siendo dispersado por el flujo de viento a los interiores de la industria electrónica en regiones tropicales. La radiación solar es otro factor en la presencia de la corrosión, por generar corrosión seca.

2.8.4 Casos de corrosión en interiores de la industria electrónica.

Los equipos electrónicos instalados en interiores de la industria electrónica, son propensos al deterioro de las uniones metálicas, por el fenómeno de corrosión. En los últimos 20 años, se han presentado una gran diversidad de causas y consecuencias de la

generación de corrosión en conectores y conexiones eléctricas de equipos electrónicos (Ponchak, 2004). A continuación se presentan algunos casos prácticos:

a. Corrosión de la plata usada en interruptores electrónicos de televisión en la empresa Sony de Tokyo. La ocurrencia de corrosión fue en el área de ensamble de estos dispositivos, que se instalaban en tableros electrónicos de televisores, ocasionando problemas de soldabilidad y bajo rendimiento operativo de los interruptores (Ponchak, 2004). La corrosión en la plata se observó con superficies de color negro y café oscuro, dependiendo del tiempo de exposición. En el periodo de la generación de corrosión, la humedad relativa fue de 40% y la temperatura de 22° C a 25° C. Se utilizó la técnica de microscopio electrónico de barrido (SEM) y dispersión de rayos X, para determinar las sustancias químicas que se adhirieron a la plata, siendo los compuestos de azufre y cloruros los de mayor importancia. Se determinaron los índices de corrosividad en el interior de la planta por medio de la norma ISO 9223 que incluye la ISO /CD 1184, monitoreando el H₂S, cloruros (Cl) y SO₂. Se instalaron testigos de plata en lugares estratégicos de la empresa y fueron evaluados en diferentes periodos, donde se observó una coloración en los metales, de acuerdo a la concentración de los contaminantes evaluados y tiempo de exposición. La velocidad de corrosión de la plata fue lenta, pero esto origina que se presentan problemas de soldabilidad y con ello fallas eléctricas.

b. Corrosión en circuitos integrados. Estos dispositivos están constituidos de plata en ciertas secciones y, el fenómeno de corrosión ocurrió en áreas de los circuitos integrados donde se realizan las conexiones con otros componentes electrónicos. El proceso ocurrió en un cuarto limpio, que contenía filtros especiales capaces de retener partículas de hasta 2 µm, para evitar la presencia de contaminantes del aire. Como el cuarto limpio esta

aislado, no se contaminaba del exterior, y se observó que la contaminación se **originó** por la emisión de partículas de los hornos de curado de resinas, instalados dentro del cuarto. El análisis de testigos de plata instalados en el cuarto limpio, se realizó con la técnica de microscopio electrónico de barrido (SEM) y dispersión de rayos X, y determinó que los compuestos de azufre que se adherían a la plata, eran los de mayor concentración, originando Ag_2S . Se monitorearon el Cl^- , H_2S y SO_2 , y se propusieron medidas de control usando inhibidores de fase vapor. Se detectó la presencia de corrosión en otros dispositivos electrónicos, siendo básicamente de tipo uniforme, por picaduras, galvánica y por electrolisis, que ocasionaban fallas eléctricas.

2.8.5 Métodos y técnicas de control de la corrosión en la industria electrónica.

La ocurrencia de corrosión en equipos electrónicos, es difícil de detectar al inicio del proceso, y se detecta en la mayor parte de los casos, cuando se presenta la falla eléctrica (Norberg, 1997; Leygraf, 1995). Por esto se usan métodos y técnicas de protección, para prevenirla y evitar que disminuya el rendimiento operativo, siendo las más comunes:

a. Uso de inhibidores de fase vapor. También llamados inhibidores volátiles de corrosión (VCI, volatile corrosion inhibitor, por sus siglas en inglés); son sustancias químicas líquidas o sólidas, que se vaporizan a temperatura ambiente. Se mezclan con la atmósfera donde se instalan y se adhieren a superficies metálicas de los conectores y conexiones de equipos electrónicos, para formar una película de protección (anódica o catódica, según el metal y proceso de inhibición), que impide la formación de una capa de electrolito. Los mecanismos de la inhibición forman una película de pasivación que detiene el proceso de corrosión. Algunos de los inhibidores más comunes son aldehídos,

aminas, cromatos, nitratos y fosfatos. Científicos y técnicos de corrosión describen una gran cantidad de inhibidores, pero sólo algunos están en práctica, por las características de costo, toxicidad, disponibilidad y para evitar daño al medio ambiente. Los inhibidores se clasifican de acuerdo a su funcionalidad: anódicos, con una película pasivadora en superficies que previene la oxidación y catódicos que retardan la corrosión. Los inhibidores de corrosión se adhieren a pinturas usando elementos pasivadores que eliminan el estado activo con técnicas de protección anódica y catódica. Los inhibidores de corrosión fase vapor son entre otras especies químicas sales carboxilatos de aminas, con una eficiencia del 90% (Baeza, 2003). Otro tipo de inhibidor utilizado es el recubrimiento de conversión química.

b. Sustancias secantes. Son utilizadas para remover la humedad del ambiente, conteniendo propiedades higroscópicas, que eviten la condensación de agua sobre superficies metálicas.

c. Mantenimiento preventivo. Se realiza en diferentes periodos de tiempo dependiendo la agresividad de los ambientes interiores, para evitar la generación de fallas eléctricas de los equipos electrónicos. Se elaboran básicamente planes de limpieza y reemplazo de partes, para obtener la máxima eficiencia en los procesos industriales.

d. Condicionamiento de ambientes interiores. Es necesario tener microclimas donde se controle los parámetros de humedad y temperatura a las condiciones requeridas para los procesos industriales, sin que ocurra el fenómeno de corrosión.

e. Uso de encapsulados aislantes. El objetivo es tener materiales aislantes que evitan la acumulación de agua en ciertas áreas de los conectores y conexiones eléctricas, así como la presencia de contaminantes que generan la corrosión en metales.

Los costos por corrosión se definen por el efecto en materiales metálicos y métodos de control (Peterson, 1999). Además de estos costos, se agregan los realizados para investigación, entrenamiento de personal y mantenimiento de equipos (Roberts, 2001; Feliu, 1995).

2.9 Corrosión atmosférica.

Es un proceso que origina deterioro en materiales metálicos, ocasionando cambios en sus estructuras y propiedades físico-químicas, por la interacción de éstos con sus ambientes en donde se presentan variaciones de humedad y temperatura, así como niveles altos de concentración de contaminantes en una solución (Santana, 2003). El parámetro más importante en la generación de corrosión atmosférica es la humedad, lo que la hace diferente de la corrosión seca y por gases, cuyo mecanismo del fenómeno es de naturaleza química. Cuando el metal es destruido se convierte en productos de corrosión que forman vías de conducción eléctrica en áreas no deseables de conexiones y uniones que ocasionan fallas eléctricas y un decremento en el rendimiento operativo de equipos electrónicos. La corrosión atmosférica ocurre de manera espontánea, y es necesario aplicar métodos y técnicas de protección para controlarla, disminuirla y prevenirla (Frankenthal, 2002; Johansson, 1998). El mecanismo de la corrosión atmosférica es electroquímico, donde se realiza un intercambio de masas e intercambio de partículas cargadas (iones y electrones) en la interfase metal (conductor electrónico) y electrolito (conductor iónico) y se origina una polarización anódica y catódica en diferentes zonas del metal (Potencial REDOX). La formación de celdas galvánicas en la superficie metálica, origina un flujo de electrones (corriente eléctrica). La corrosión atmosférica se presenta principalmente de dos maneras: corrosión uniforme y localizada. Los ambientes

a los cuales se exponen los equipos electrónicos incluyen diversas etapas como procesos de manufactura, almacenamiento y embarque, en los cuales ciertos gases de ambientes exteriores y variaciones de humedad y temperatura afectan las condiciones climáticas de interior generando un ambiente agresivo que origina la corrosión. Las películas delgadas de electrolitos en ocasiones visibles, forman una superficie metálica bajo condiciones de corrosión atmosférica, siendo la humedad y la resistencia a la corrosión del metal, los factores críticos para su desarrollo. Por ejemplo para ciertos tipos de acero con un 60% de humedad en ambiente limpio, se origina la película del electrolito. La corrosión atmosférica se origina de reacciones electroquímicas de tipo anódico y catódico. La reacción anódica involucra la disolución del metal en el electrolito, mientras que la reacción catódica frecuentemente es por la reacción de reducción de oxígeno (figura 2.13).

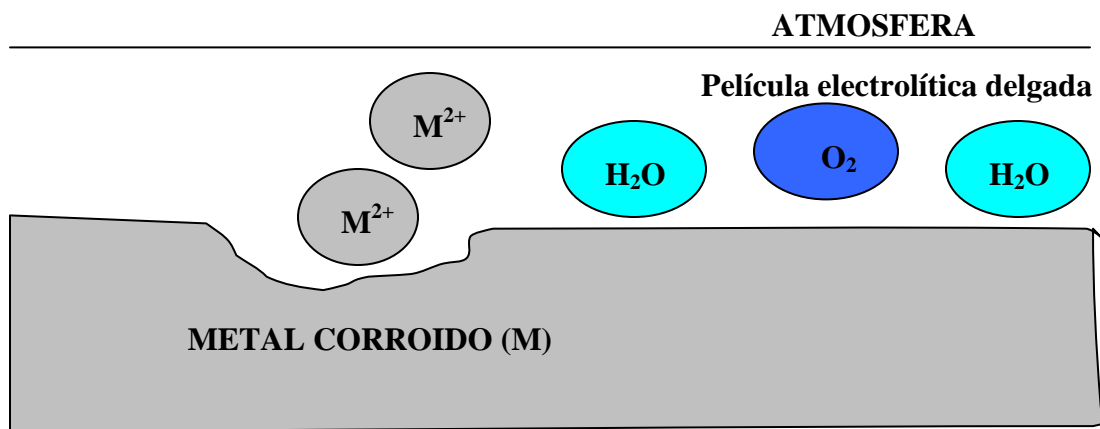


Figura 2.13. Proceso electroquímico que origina la corrosión atmosférica.

La naturaleza higroscópica de los productos de corrosión depositados en la superficie metálica y la presencia de contaminantes del aire aceleran el proceso electroquímico y el fenómeno de corrosión en soluciones acuosas (Katayama et al, 2005; Veleva, 1998). En ocasiones se realizan pruebas simuladas de corrosión atmosférica en metales usados en la industria electrónica con circuitos externos de una celda de prueba. En esta celda se miden corrientes impresas que fluyen por ésta, para determinar las características de la corrosión, evaluando la densidad de corriente en la celda de prueba.

2.10 Diseño estructural de equipos electrónicos.

El ingeniero de diseño considera importante desarrollar estructuras en equipos electrónicos que eviten el almacenamiento de humedad y agentes corrosivos del ambiente, así como la de sellar uniones de metales diferentes (Rothwell, 2000, Jasner, 1998). Además se utilizan aislantes que cubren las conexiones metálicas de equipos electrónicos. Una vez elaborado el pulido final de metales como aluminio, acero y cobre, se usan tratamientos de superficies. Estas son algunas de las características que sirven como indicadores para la durabilidad y confiabilidad de los equipos electrónicos. Los adhesivos de la soldadura tienen bajo nivel de acidez y los materiales metálicos pasivos tienen una alta resistencia a la corrosión, con el mínimo posible de estrés (Guttman et al, 1998; Stanley, 2006). Otro aspecto es usar cintas adhesivas para conectores y uniones metálicas de fluorocarbono o silicio, en forma de círculo y sellados. También es importante, usar metales que no generen dispersión en el flujo de corriente eléctrica e instalar componentes en los tableros con al menos 0.5 milímetros de separación. El diseño debe ser desarrollado para elaborar un fácil mantenimiento de los equipos

electrónicos y montar los tableros electrónicos de los equipos de forma vertical, con el objetivo de evitar la acumulación de humedad (Veleva, 1997). Instalar los conectores de los equipos de manera horizontal, para que no se almacene agua, además de que las áreas de instalación y tuberías con cables eléctricos deben tener zonas para drenar el agua almacenada y utilizar sistemas de eliminación de humedad y contaminantes del aire con indicadores visuales o automatizados (Ashrae, 1999; Kihira et al, 2005). Además, se usan selladores de plástico circulares en componentes y equipos electrónicos para evitar la penetración de humedad o fluidos que circulen alrededor.

METODOLOGÍA

El agua existe en la tierra como fase líquida, vapor y sólida, y al existir como vapor, se origina un aire húmedo. Los niveles de humedad dependen de la presión de vapor que existe en un ambiente determinado. La humedad relativa es el parámetro del clima más importante relacionado con la velocidad de corrosión. Para medir las velocidades de corrosión se aplicará la técnica de gravimetría midiendo las pérdidas y ganancias de peso en muestras metálicas expuestas a condiciones atmosféricas que simulen el interior de plantas de la industria electrónica. Para aplicar este método se cuenta con información de contaminantes, temperatura y humedad relativa desde el año 2003. Además, se utilizará un modelo matemático elaborado con el programa de simulación MatLab. La metodología propuesta **está** de acuerdo al estándar ASTM G 31 y los índices de corrosividad se obtuvieron con los estándares ISO 9223, ISO N381 e ISO N384.

Todos los ensayos serán realizados de acuerdo a la metodología descrita en un ambiente semi-árido con actividad industrial, como lo es la ciudad de Mexicali, Baja California, ubicada en el noroeste de la República Mexicana y es frontera con el estado de California en Estados Unidos.

3.1 Factores climáticos.

El contenido de humedad en ambientes de interiores modifica las propiedades eléctricas de los materiales debido al efecto corrosivo se incrementa al mezclarse el aire húmedo con los compuestos iónicos del metal. El clima se valoró a través de varios parámetros,

siendo la humedad relativa y temperatura los más importantes en la generación de corrosión, expresados con magnitudes, instrumentos de medición y unidades (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Los factores climáticos y su medición.

Factores	Magnitud / Fenómeno	Instrumento de medición	Unidad
Humedad relativa	Humedad	Higrómetro	%
Temperatura	Temperatura	Termómetro	° C
Presión atmosférica	Presión	Barómetro de mercurio	mmHg
Radiación Solar	Radiación	Piranómetro	W / m ²
Precipitación pluvial	Precipitación	Pluviómetro	mm
Dirección del viento	Viento	Veleta	° (Grados)
Velocidad del viento	Viento	Anemómetro	m/seg

Es importante mencionar que las condiciones climáticas, principalmente la humedad y temperatura, originan la corrosión. Siendo que el clima semi-árido en Mexicali, Baja California, es muy caluroso y con noches muy frías en el invierno. Los valores máximos y mínimos registrados en periodos mensuales de humedad relativa y temperatura de ambientes interiores muestran rangos muy variados siendo menores de 10% y mayores a 90% para la HR, y temperaturas de 0° C en la estación invernal hasta casi los 50° C en los meses de junio a agosto. Los valores mensuales del tiempo de humectación corresponden a niveles bajos y medios de corrosividad, de acuerdo a los estándares ISO 9223 e ISO 11844-1.

3.2 Información estadística.

La concentración severa de contaminantes del aire que se monitorean en la ciudad de Mexicali, son detectados y almacenados automáticamente por las EMA, por lo que es importante conocer la concentración de cada uno, debido a que penetran al interior de plantas industriales. Los contaminantes SO_2 , NO_x y CO detectados por las EMA en ambientes exteriores de Mexicali, penetran a los interiores de las plantas. Esta mezcla de contaminantes atmosféricos, aunado a variaciones de humedad y temperatura originan la corrosión de metales usados en equipos electrónicos. Para el análisis de correlación se usaron datos con periodos donde la humedad relativa y la temperatura eran mayores de 70% y 35°C , y las concentraciones de contaminantes del aire mencionados anteriormente, superiores a las normas estándares de calidad del aire. La información obtenida se organizó en tablas con las velocidades de corrosión de los metales analizados y se evaluaron usando el programa MatLab para determinar el grado de correlación entre los parámetros climáticos, de contaminación y corrosión. El mejor modelo matemático fue de regresión lineal para la relación de datos experimentales y tendencia de la velocidad de corrosión.

3.3 Herramientas del MatLab.

MATLAB es un entorno de computación numérica y lenguaje de programación, que fue creado por la empresa MathWorks y permite una fácil manipulación matriz, realización de graficas de funciones y datos, aplicación de algoritmos, creación de interfaces de

usuario entre operaciones del mismo programa y otros en diferentes idiomas. Contiene una caja de herramientas con interfaces que permite el acceso a capacidades de álgebra computacional. El objetivo de usar el MatLab en esta investigación, es porque se **realizaron** análisis de correlación de los parámetros climáticos, ambientales y de corrosión de las probetas metálicas evaluadas tanto en la cabina de simulación como en las empresas. Las graficas son tridimensionales y de tipo superficial, donde se indicarán las zonas de mayor relación entre las variables de clima, contaminantes del aire y velocidad de corrosión, para con ello determinar las causas de la generación de corrosión en materiales metálicos usados en la industria electrónica y sugerir los métodos de protección necesarios para aumentar su tiempo de vida.

3.4 Monitoreo ambiental.

La información de contaminantes del aire se obtuvo con equipos que tienen sistemas de adquisición de datos, controlados por la EPA y organizada en periodos mensuales. Los instrumentos de medición son: el analizador de quimioluminiscencia modelo 42 de Thermo Environmental Instruments Inc. para detectar los NO_x, el equipo para evaluar el CO de modelo 300E API (Advanced Pollution Instruments Inc.), el detector fotométrico modelo 43C de Termo **Electron** Corporation para el SO₂ y el analizador modelo 400 de la API para el O₃. Estos instrumentos tienen filtros especiales para detectar gases y partículas (Anexo E. Equipos de monitoreo y análisis de corrosión atmosférica).

3.5 Exposición de probetas metálicas.

Se utilizaron en la investigación especímenes metálicos rectangulares con un área aproximada de 0.0645 m^2 (figura 3.1), que se pesaron en una microbalanza con una confiabilidad de $\pm 10 \mu\text{g}$.

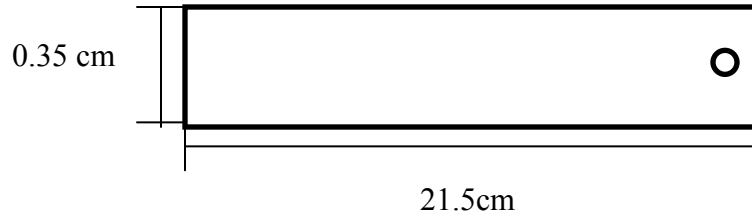


Figura 3.1 Estructura dimensional de las probetas metálicas.

Las probetas de los experimentos de corrosión fueron: acero al carbono, cobre, estaño, níquel y plata, con periodos de exposición de 1, 3, 6, 12 y 24 meses en posición vertical. Una cabina metálica de aluminio con un espesor de pared 0.6 mm, un volumen de 0.1 m^3 (105X45X65cm) y ventanas con persianas a los lados a 35cm de la parte superior que permite la libre circulación de aire, fue construida para simular las condiciones de ambientes de interiores (Figura 3.2), e instalada a 10 metros de altura del suelo.



Figura 3.2. Cabina metálica para ensayos de corrosión bajo condiciones de interior de planta simuladas.

Los especímenes se colocaron en un soporte metálico dentro de la cabina mediante ganchos de alambre aislado con plástico en posición vertical. Las probetas se prepararon en las siguientes etapas: pulido con papel de SiC desde 100 a 600, limpieza con agua deionizada, eliminación de grasa con etanol, secado con aire caliente y almacenamiento en bolsas de plástico instaladas en un desecador con gel de sílica. Posteriormente los especímenes se pesaron en una balanza analítica con una resolución de $\pm 0.00001\text{g}$. La clasificación de las categorías de corrosividad para cada caso fue referida a los indicadores establecidos en los estándares ISO 9223 e ISO 1184-2.

El deterioro de las probetas metálicas evaluadas con el método gravimétrico, se correlacionó con los niveles mínimos, promedios y máximos de humedad relativa y temperatura de exterior en los diferentes periodos **estacionales**, que afectan los climas de interior de las plantas de la industria electrónica establecidas en la ciudad de Mexicali a 30 km del campo geotermoeléctrico de Cerro Prieto.

3.6 Métodos de medición.

Un método muy usado para evaluar la velocidad de corrosión, es el gravimétrico usando el estándar ASTM G31 (ASTM 2001), en periodos estacionales y en diferentes ambientes, para obtener la pérdida de peso de metales.

En esta investigación el método de medición gravimétrica siguió las recomendaciones de este estándar con las dimensiones, geometrías de muestras de ensayo, procedimiento de limpieza, acabado superficial, pesado, almacenaje y colocación de la muestra ya

mencionadas. El arreglo para montaje en la cabina instrumentada con equipo para medición de temperatura y humedad relativa se muestra en las figuras 3.3 y 3.4.



Figura 3.3. Detalle del montaje de muestras metálicas e instrumentación con higrómetro de la cabina de simulación de condiciones de interiores para ensayos de corrosión.

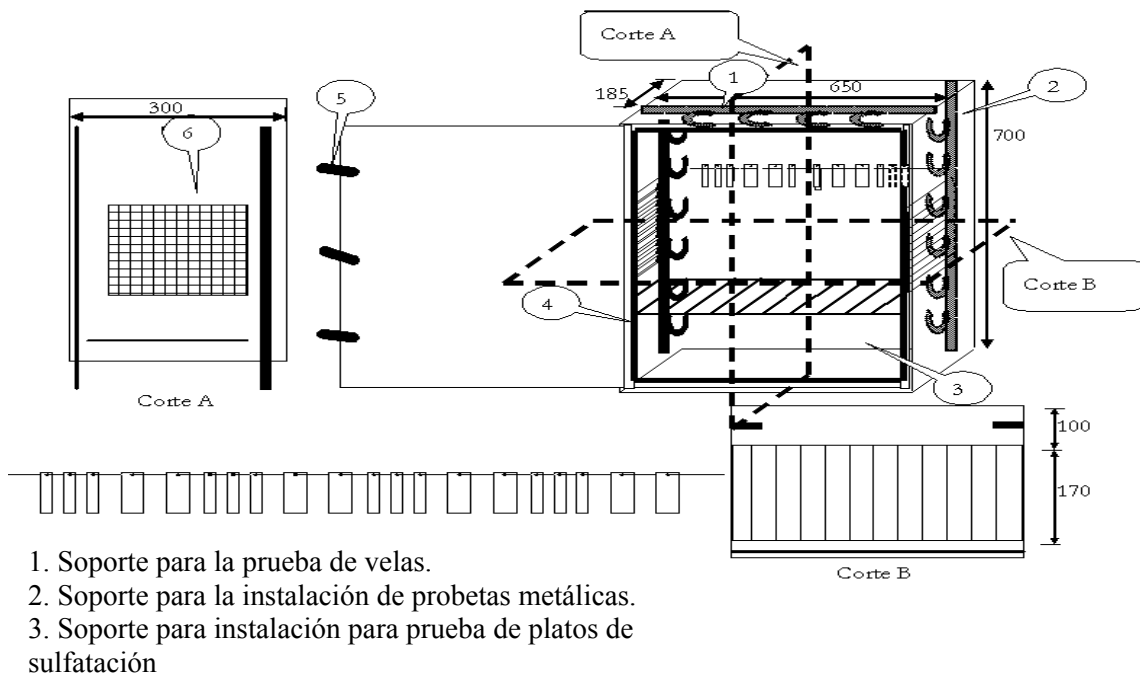


Figura 3.4. Diseño estructural de la cabina de simulación para la velocidad de corrosión de las probetas metálicas.

3.6.1 Análisis gravimétrico.

Además de los ensayos en cabina de simulación, se instalarán probetas metálicas por periodos de 1, 3, 6, 12 y 24 meses; en áreas estratégicas de empresas para ser expuestas a contaminantes del aire proveniente de fuentes exteriores y los procesos de producción en los interiores, de tal modo que fuese posible establecer un patrón de comparación entre ambos ambientes. Después de cada periodo de exposición las probetas se retiraron y se pesaron para obtener el peso ganado debido al proceso de corrosión. Posteriormente se limpiaron para obtener su peso final para evaluar la velocidad de corrosión. La morfología de los agentes corrosivos se analizará primeramente en un estereoscopio con capacidad de máximo 40X y también con microscopio electrónico de barrido (MEB), donde además, se realizarán ensayos de composición química por electrones dispersados de rayos X (EDX) antes de que los metales corroídos se limpiaron.

3.6.2 Técnica de platos de sulfatación.

Para determinar la concentración de sulfatos en interiores; se prepararon, instalaron y evaluaron platos de sulfatación de 10 cm. de diámetro en interiores de plantas industriales. Los sulfatos penetran a través de corrientes del aire exterior por grietas u orificios, puertas de acceso y por los sistemas de aire acondicionado que carecen de filtros especiales. Los periodos de exposición se determinan de acuerdo a la agresividad de los ambientes de interior, que pueden ser diarios, semanales, mensuales, estacionales o anuales, que para el caso de esta investigación se encontró que el período más adecuado

es el mensual. La cantidad de materiales y reactivos depende del número de platos a preparar y para realizar este experimento se utilizó:

a. Material. Cajas de Petri, filtros de papel Whatman # 42, tubos de ensayo y pipeta graduada de 100 ml.

b. Reactivos. Acetona, dióxido de plomo (PbO_2), agua destilada y goma de tragacanto.

c. Equipos. Un horno eléctrico y un espectrómetro para análisis de rayos ultravioleta.

• **Procedimiento.** El papel Whatman No. 42 se coloca en los platos de sulfatación y se le agrega una mezcla con las cantidades necesarias de acetona, PbO_2 , agua destilada y goma de tragacanto. Una vez que se tienen los platos con la mezcla utilizando los tubos de ensayo y la pipeta, se introducen a un horno eléctrico a una temperatura de 45°C por un periodo de 12 horas hasta que queden completamente secos y se instalan en los lugares de exposición de ambientes corrosivos junto a un plato blanco usado como indicador de referencia (figuras 3.5 y 3.6). Es importante conocer el método de preparación de los platos de sulfatación para determinar con mayor confiabilidad los sulfuros presentes en los interiores de la industria electrónica (figura 3.7).

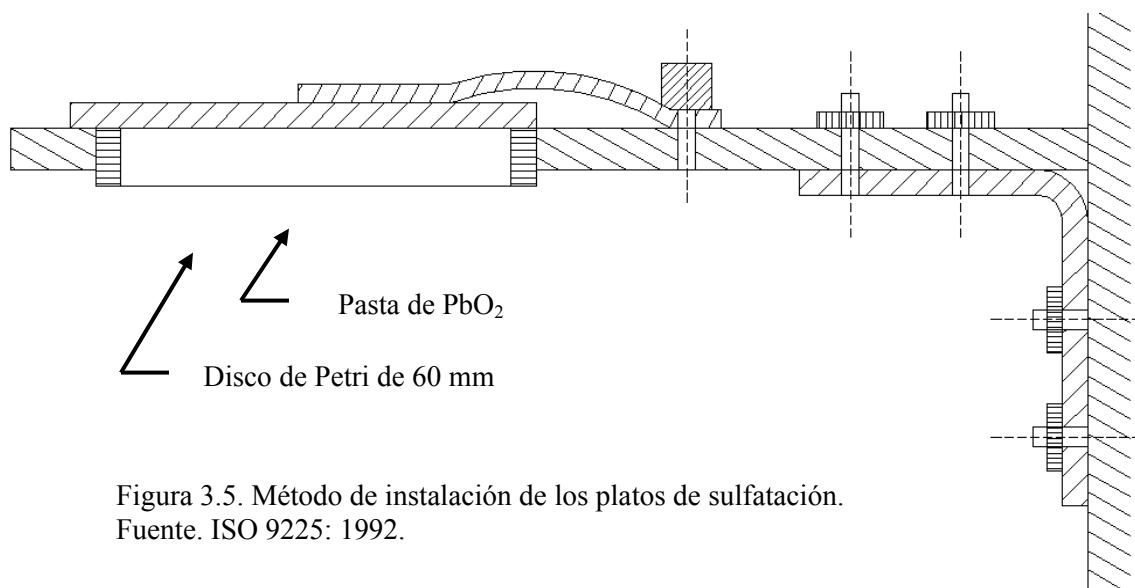


Figura 3.5. Método de instalación de los platos de sulfatación.
Fuente. ISO 9225: 1992.

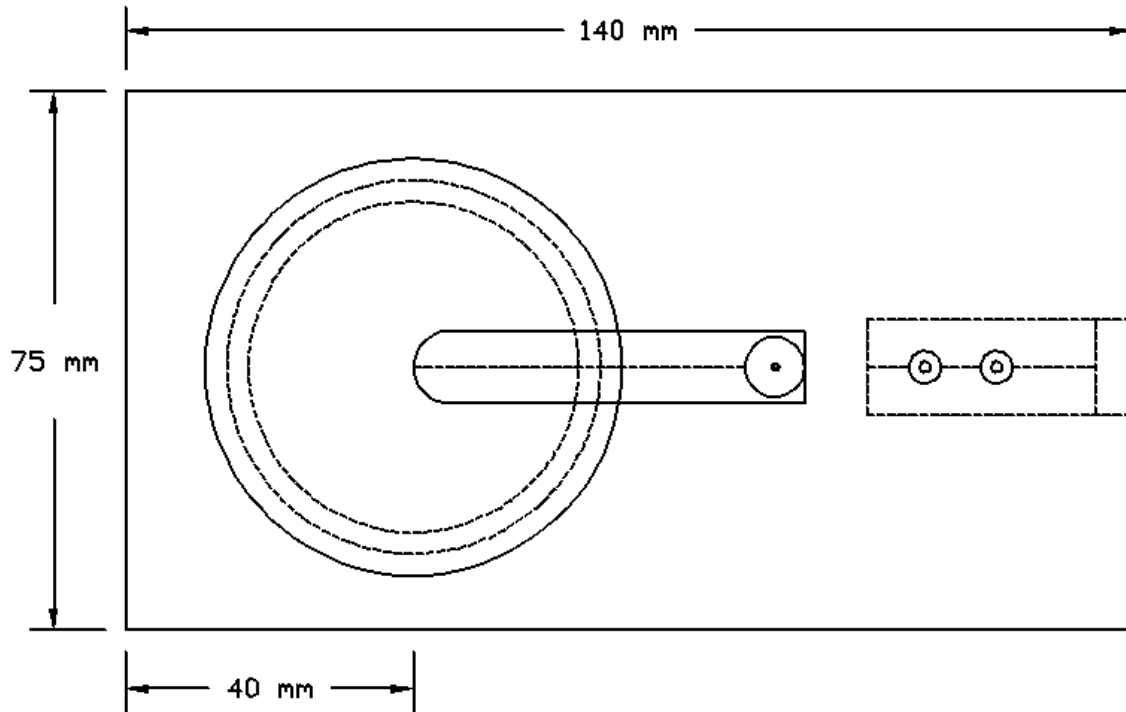


Figura 3.6. Características dimensionales de los platos de sulfatación.
Fuente. ISO 9225: 1992.

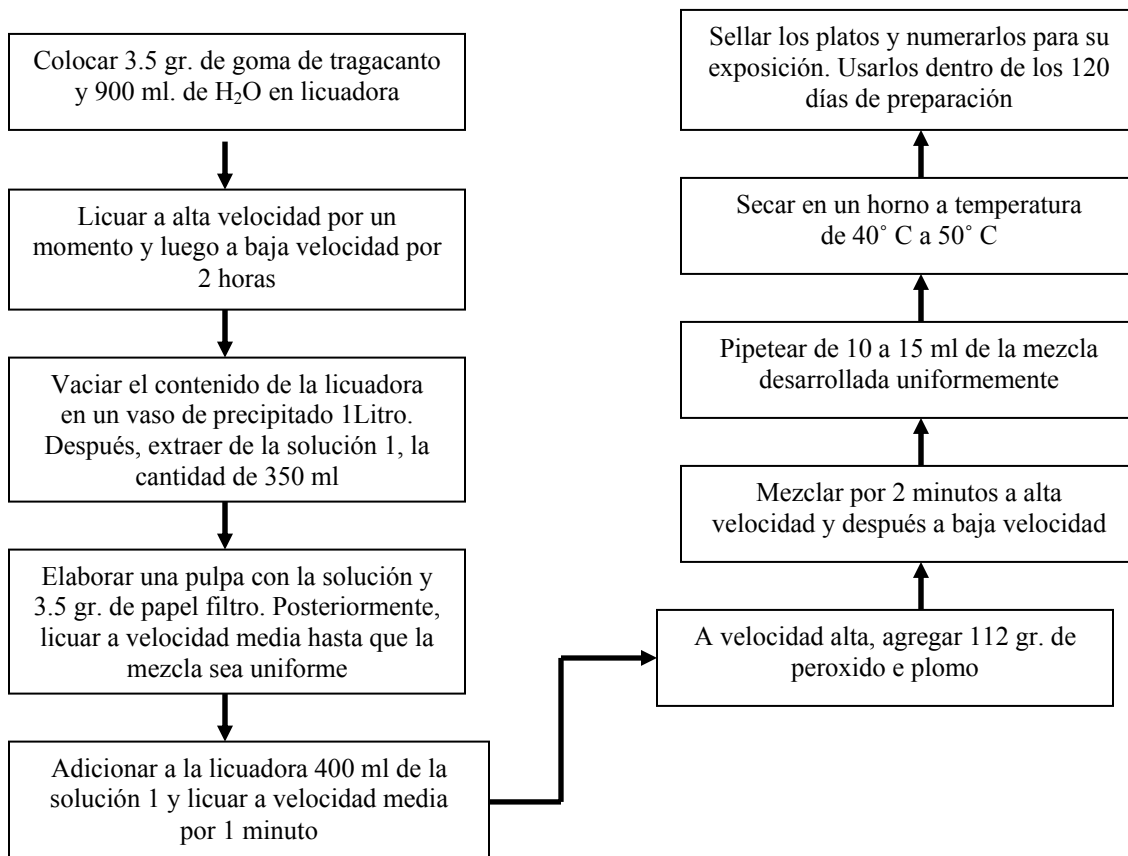


Figura 3.7 Etapas de preparación de la técnica de los platos de sulfatación.

Después del periodo de exposición indicado, se recuperan los sulfatos en una solución acuosa y se analizan en un espectrofotómetro ultravioleta visible, para conocer la concentración de sulfatos por medio de una evaluación técnica (figura 3.8). Determinando los niveles de sulfatos se convierten a SO_2 con la siguiente ecuación matemática:

$$R = (m - m_0) \times M\text{WSO}_2 / M\text{WSO}_4 \times A \times T, \quad (19)$$

donde

$R = \text{SO}_2$ velocidad de deposición en el plato, $\text{mg SO}_2 / \text{m}^2 \cdot \text{día}$.

$m =$ masa de la concentración de sulfato en el plato de prueba en mg .

$m_0 =$ masa de la concentración de sulfato en el plato usado como blanco, en mg .

$M\text{WSO}_2$ (Peso atómico del SO_2) = 64.

$M\text{WSO}_4$ (Peso atómico del SO_4) = 96.

$A =$ Área del plato de sulfatación, en m^2 .

$T =$ Tiempo de exposición, en días.

En base a esta conversión se conocen las concentraciones de SO_2 , que s uno de los principales promotores de la corrosión en metales usados en la industria electrónica.

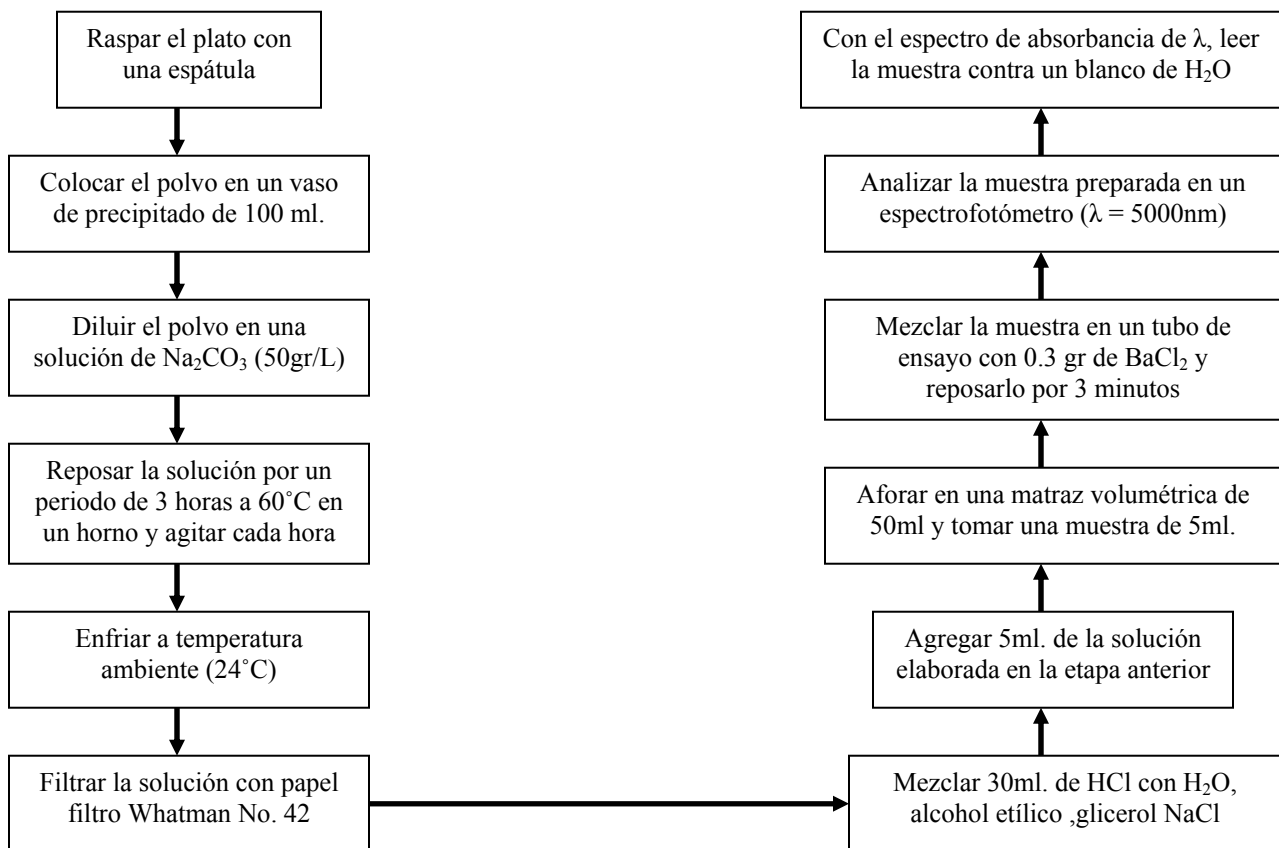


Figura 3.8. Etapas de análisis con la técnica de los platos de sulfatación.

3.6.3 Método de análisis de cloruros con la vela húmeda.

El método de la vela húmeda describe a un dispositivo con una vela húmeda y se uso para medir la velocidad de deposición atmosférica de sales de cloro en un área determinada por unidad de tiempo. La información obtenida de la deposición de cloruros, se utiliza para clasificar el nivel de corrosividad de un área específica, por ejemplo las condiciones de interior de la industria electrónica. El estándar que se basa para desarrollar el proceso experimental es el ISO 9223 con referencia a ASTM G140-96, con unidades de medición de $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{año}$. Esta prueba se realiza porque los niveles de cloruros en interiores incrementan la corrosión atmosférica, siendo un factor importante en un proceso electroquímico. En ocasiones la adhesión de cloruros a superficies metálicas, ocasiona procesos inestables en ciertos metales, generando e incrementando la velocidad de corrosión, como el cobre y zinc, donde las sales no se disuelven fácilmente, generando corrosión en algunas zonas del metal, originando picaduras. Las concentraciones de cloruros en el interior de plantas industriales dependen de las condiciones climáticas, siendo la humedad relativa y la temperatura los principales parámetros.

Materiales.

- ◆ Embudo de cristal de 65 mm de diámetro con un largo total aproximado de 115 mm.
- ◆ Matraz Erlenmeyer de 250 ml.
- ◆ Papel de filtro Whatman cualitativo #2 (Categoría No. 1020 110) de 11 cm de diámetro.
- ◆ Agua destilada (libre de cloruros)
- ◆ Matraz aforado de 50 ml.

Procedimiento.

Se lavan el embudo y el erlenmeyer varias veces con agua destilada asegurando que no tengan ninguna contaminación sobre su superficie, particularmente de cloruros. Se introduce la gasa y se pega al embudo con agua destilada. Se pone el embudo sobre el erlenmeyer y se coloca en los interiores de empresas durante el período establecido. Se colocan como mínimo dos captadores para cada punto. El tiempo recomendado son tres meses para atmósferas de baja contaminación y para altos niveles se evalúan mensualmente. Al cumplirse el período establecido se retira el conjunto del embudo con la gasa y el erlenmeyer protegiéndolo de roturas, contaminación o daño. (Puede introducirse en un estuche plástico limpio donde no pueda romperse ni contaminarse). Se lleva al laboratorio donde se lava bien la gasa sobre el embudo utilizando alrededor de 40 ml de agua destilada, se separa el papel de filtro del embudo y se echa en el erlenmeyer, dejándolo en maceración por aproximadamente 24 h. Después de la maceración se filtra la solución con el papel de filtro a través de otro papel de filtro de igual calidad y se enrasa en un matraz aforado de 500 ml (fiura 3.9). Se mide la conductividad de la solución y se determina la concentración de cloruros turbidimétricamente siguiendo el procedimiento de la norma NMX-Y-239-1982, establecido en ISO-9225 "Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Measurement of pollution"

Nota. Siempre será muy útil la determinación de la velocidad de deposición de cloruros a la intemperie de acuerdo a lo establecido en ISO-9225 como es tradicional en los ensayos de corrosión. También sería útil, para los que tengan las condiciones (un armario extra), determinar la salinidad por la vela húmeda en el interior del armario.

De esta forma tenemos un método muy sencillo de realizar y como lo haremos todos iguales podremos comparar los resultados. Debemos tener en cuenta que en condiciones

de interior los cloruros disminuyen su papel y generalmente son otros factores los mas importantes. Incluimos la determinación de la conductividad de la solución para tener una mejor idea de la concentración total de sales presentes. El cálculo de la titulación es el siguiente:

$$\text{mgCl}^-/\text{L} = [(\text{ml AgNO}_3 \text{ usado} - \text{B}) \times \text{T} \times 1000] / \text{ml de la muestra} \quad (20)$$

donde

T = nivel de titulación mgCl^-/L de AgNO_3 usado

B = Indicador blanco.

Y por el periodo de exposición se tiene la siguiente ecuación matemática:

$$\text{mgCl}^-/\text{m}^2 \cdot \text{día} = (\text{mgCl}^-/\text{L}) \times (2At) \quad (21)$$

donde

t = días de exposición.

A = Área (m^2) de gasa expuesta, determinada por $A = \Pi \times D \times (D+1)$, D=diámetro del tubo.

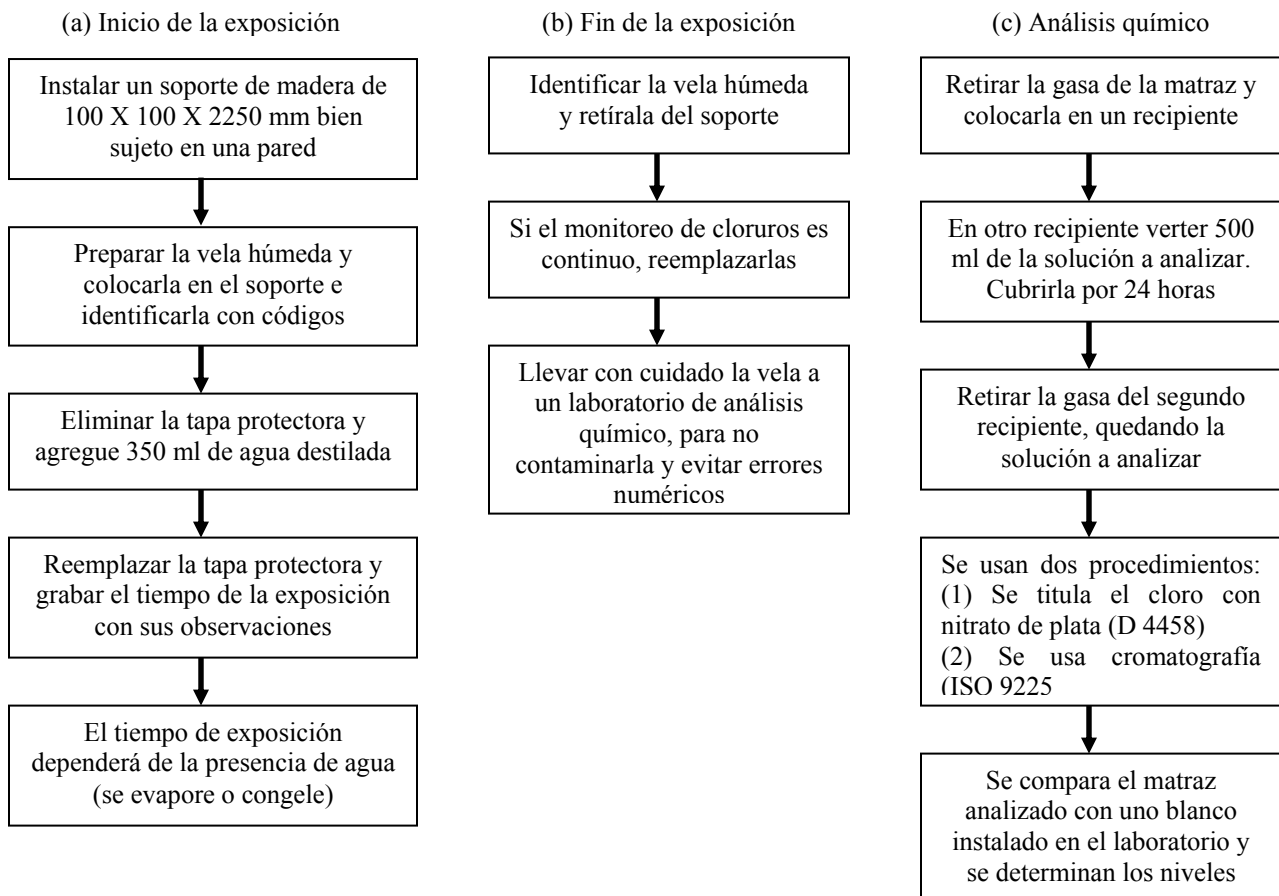


Figura 3.9. Etapas del (a) inicio, (b) fin de exposición y (c) análisis químico de la vela húmeda.

3.6.4 Microscopia eletrônica de barrido (SEM).

Esta técnica se utiliza para conocer la morfología de la superficie por EDS, con el fin de observar los elementos y compuestos que se adhieren a las superficies metálicas de los especímenes analizados, así como sus unidades estructurales. Los electrones que fluyen por el instrumento generan baja energía que mostró la topografía de los especímenes metálicos evaluados, que indicó el análisis de partículas, detección de materiales defectuosos y problemas de metalurgia. Una vez que se determina la composición química de elementos y compuestos en las muestras, se observa la distribución espacial de éstos, con el fin de conocer **cuál** de los agentes contaminantes se deposita y/o reaccionan en el metal y saber que tanto influyen **éstos** en la generación del proceso de corrosión. Se realiza una distinción entre los diferentes compuestos para conocer el posible estado de oxidación de los iones metálicos involucrados en los productos de corrosión. Esto permite conocer la morfología de los productos de corrosión en la superficie en función de la composición elemental de estos. Con esta técnica se conoce de forma detallada, rápida y con precisión, la forma estructural y localización de agentes corrosivos, con el cual se determinó el tipo de corrosión, contaminantes del aire que originan el fenómeno de corrosión y que permitan proponer los métodos y técnicas de protección para los materiales metálicos. El equipo llamado SEM, que analiza la superficie se conecta a una computadora en donde se recopila la información del análisis y se muestran los elementos químicos adheridos al metal (figura 3.10). Un caso en particular de análisis es del cobre, por ser muy utilizado en la industria electrónica, que cuando ocurrió el fenómeno de corrosión, se mostró la composición fisicoquímica de los agentes corrosivos formados su superficie y que en ocasiones no permitía el flujo de

corriente eléctrica. El equipo cuenta con escala micrométrica que permite realizar mediciones en las superficies analizadas.



Figura 3.10 Microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscope).

3.6.5 Análisis Químico (EDS).

Esta técnica opera en conjunto con el SEM, genera electrones retrodispersados y fotones de rayos-X en el proceso de la interacción del haz de electrones con la muestra. El análisis de la composición de una muestra, es desarrollado con la integración del microscopio electrónico de barrido y la espectroscopia de energía dispersa, con el cual se obtiene la estructura superficial y la composición de la muestra (figuras 3.11 y 3.12).



Figura 3.11 Analizador SEM/EDS.

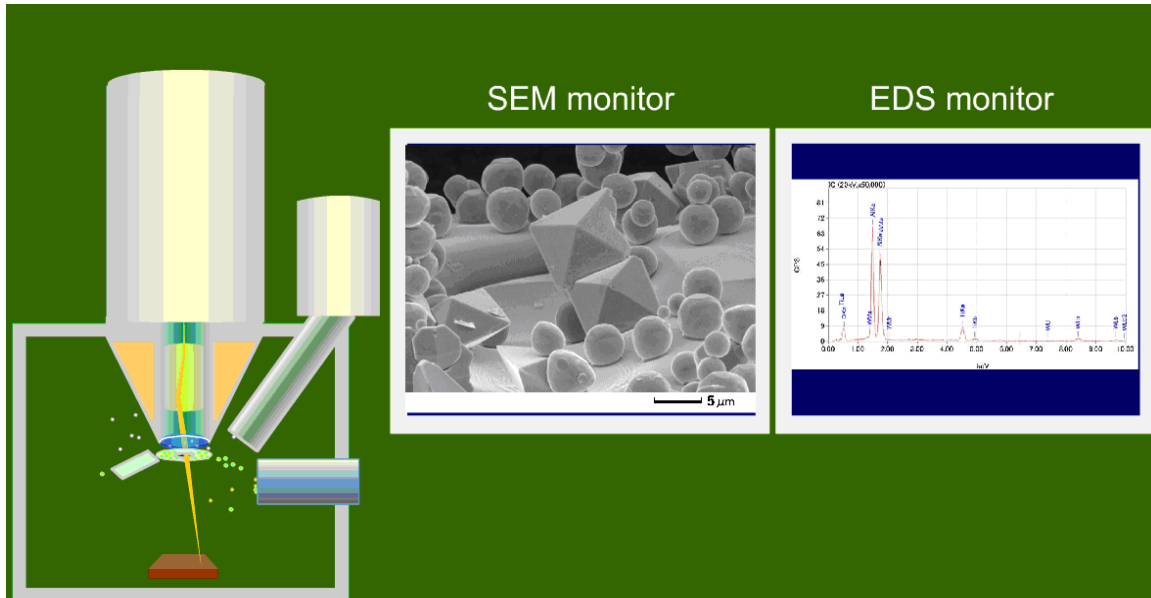


Figura 3.12 Adquisición de la imagen SEM.

En el SEM se producen electrones secundarios que se absorben rápidamente y solo se detecta a una profundidad de 1 a 10nm, mientras que con el EDS que son de mayor energía, el análisis de profundidad es de 0.1 a 1 μm y con el de rayos-X, la detección es de 0.2 a 2 μm (figura 3.13).

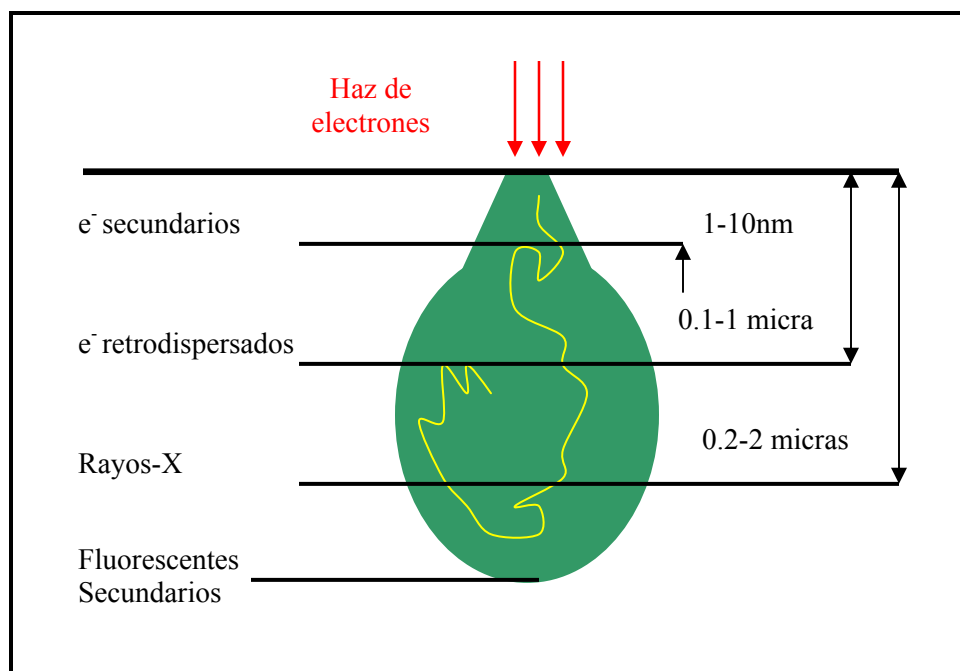


Figura 3.13 Análisis de profundidad de la generación de las señales del SEM.

La señal de electrones retrodispersados es originada por la colisión elástica del haz de electrones primarios con un núcleo dentro de la muestra. Las colisiones ocurren cuando el núcleo es grande, es decir, cuando el número atómico es grande y muestran el contraste de números atómicos y fases. Una fase de mayor número atómico produce más electrones retrodispersados y se obtiene una imagen mas clara. Las señales de rayos-X son generadas cuando el haz de electrones origina una salida de un electrón de una capa interior, y éste toma su lugar para producir la salida de un fotón de rayos-X, cuya energía se relaciona con la masa nuclear y la diferencia en las energías de los orbitales de los electrones involucrados (figura 3.11).

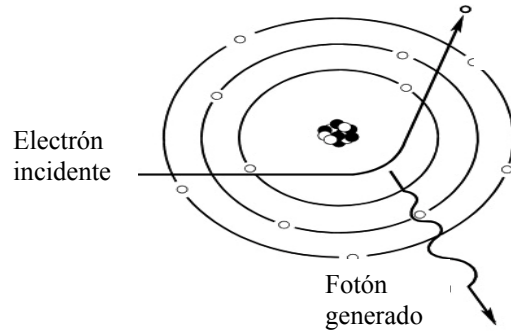


Figura 3.14 Proceso de bombardeo de haz de electrones en una muestra.

El equipo cuenta con un programa para identificar a los elementos que componen la muestra. Los rayos-X se clasifican en un espectro de energía de manera ascendente, es decir, de un número atómico con baja energía, a un número atómico de alta energía, para con ello conocer la composición de la muestra. En el interior del SEM, se localizan los detectores para las diferentes señales que se producen: el detector de electrones secundarios, el de electrones retrodispersados y el detector de fotones de rayos-X que originan la energía dispersiva (figura 3.12).

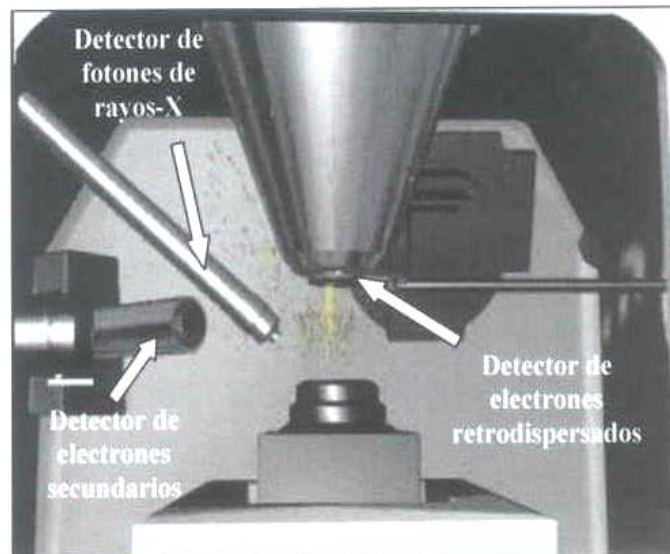


Figura 3.15 Localización de los detectores en el interior de la cámara del microscopio de barrido electrónico.

RESULTADOS

El origen de la corrosión en materiales metálicos usados en interiores de la industria electrónica es debido a factores climáticos y concentración de contaminantes del aire. En la época invernal, se genera corrosión uniforme por la película humectante que se forma en metales, y en verano en estos materiales aparecen picaduras, como resultado de que algunas pequeñas gotas se adhieren a ciertas zonas de la superficie metálica. Esto es en parte al tiempo de humectación (TH) obtenido con la humedad relativa y temperaturas mayores a 80% y 0° C, característicos de esta ciudad en ciertos periodos del año.

4.1 El clima en Mexicali.

La corrosión en metales usados en interiores de la industria electrónica se inicia en atmósferas de interiores influenciadas por condiciones climáticas de exteriores (Sereda, 1995). El tiempo de humectación obtenido con la humedad relativa (HR) y temperatura de la ciudad de Mexicali del 2003 es semejante a los siguientes años, muestra índices altos en algunos periodos de invierno y verano, siendo un factor importante para saber el tipo de corrosión que se presenta en los metales y los niveles en que se incrementa la velocidad de corrosión. En este proceso se forman celdas electroquímicas galvánicas de corrosión, como por ejemplo en la unión del platino y zinc (0.2 voltios), los cuales son capaces de originar una falla eléctrica. El nivel mínimo del tiempo de humectación durante el periodo invernal se presentó en diciembre con un valor de 58 ciclos y el máximo en febrero con 163 ciclos, en un rango de temperaturas en ambientes exteriores de 4°C a 24°C, originando que en ambientes interiores, se formará una película húmeda

en la superficie metálica, que origina un proceso de corrosión uniforme. En julio y agosto la humedad relativa es mayor al 80%, y con temperaturas mayores a los 35° C, se forman gotas en algunas áreas de la superficie metálica, generando corrosión en zonas selectivas del metal, principalmente por picaduras. El tiempo de humectación en el verano fue de 47 ciclos como valor mínimo en junio y un máximo de 135 ciclos en el mes de agosto (Figura 4.1). Este factor es indispensable para conocer la cinética de la corrosión que se presenta en materiales metálicos usados en la industria electrónica, siendo ésta mayor en verano que en invierno. Aún cuando el TH se presentó en un nivel mayor en febrero que en agosto, la velocidad de corrosión fue mayor en el mes de verano que en el de invierno por el efecto de la temperatura la cual fue mayor a 35° C. El diseño de componentes y equipos electrónicos, así como el tamaño, estructura y características de la superficie metálica, son fundamentales para evitar que se genere la corrosión.

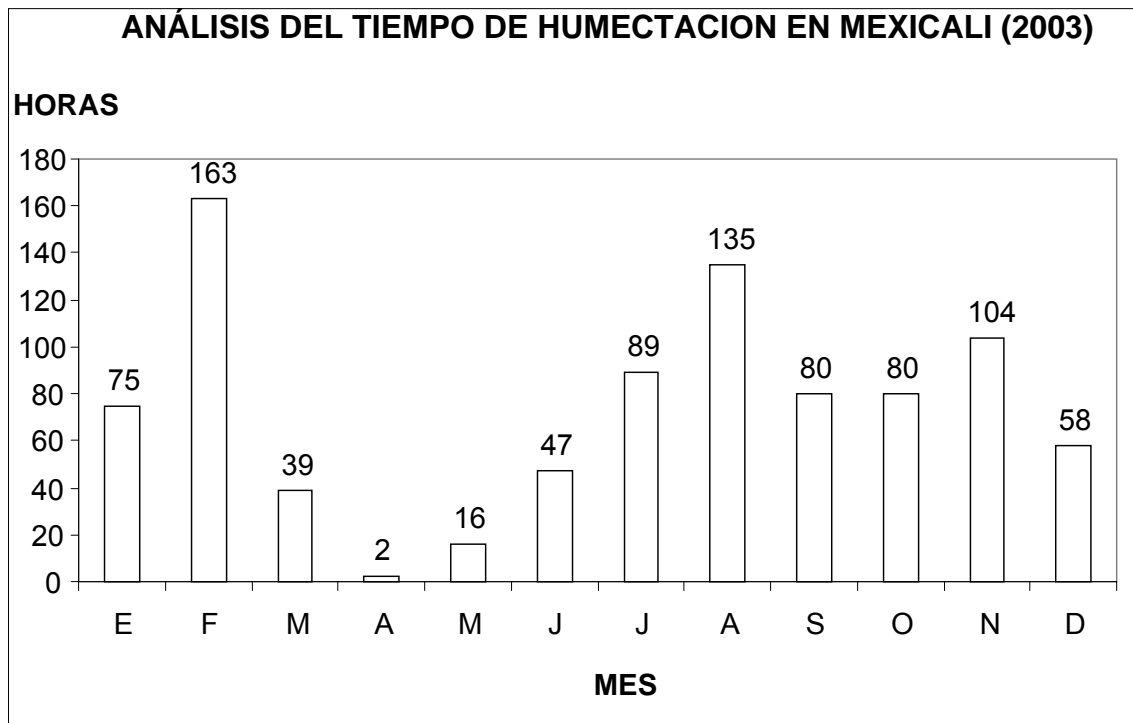


Figura 4.1. Tiempo de Humectación por horas en la ciudad de Mexicali.

Para la obtención de ciclos del tiempo de humectación de los parámetros climáticos en esta ciudad, se consideraron valores de HR > 70% para cualquier época y se tomó en cuenta los niveles de temperatura en verano de exterior que influye en el ambiente de interiores, con la combinación con contaminantes del aire como sulfuros y cloruros, para observar el proceso de corrosión en los metales evaluados. El fenómeno es más detectable en los meses de febrero (15%), agosto (12%), julio (11%), octubre (11%), septiembre (11%), noviembre (9%) y enero (8%). En el periodo anual restante, el tiempo de humectación presenta índices menores, pero no se descarta que pueda generarse en un menor grado corrosión en los metales (Figura 4.2).

Análisis porcentual de la fracción parcial del tiempo de humectación en Mexicali (2003)

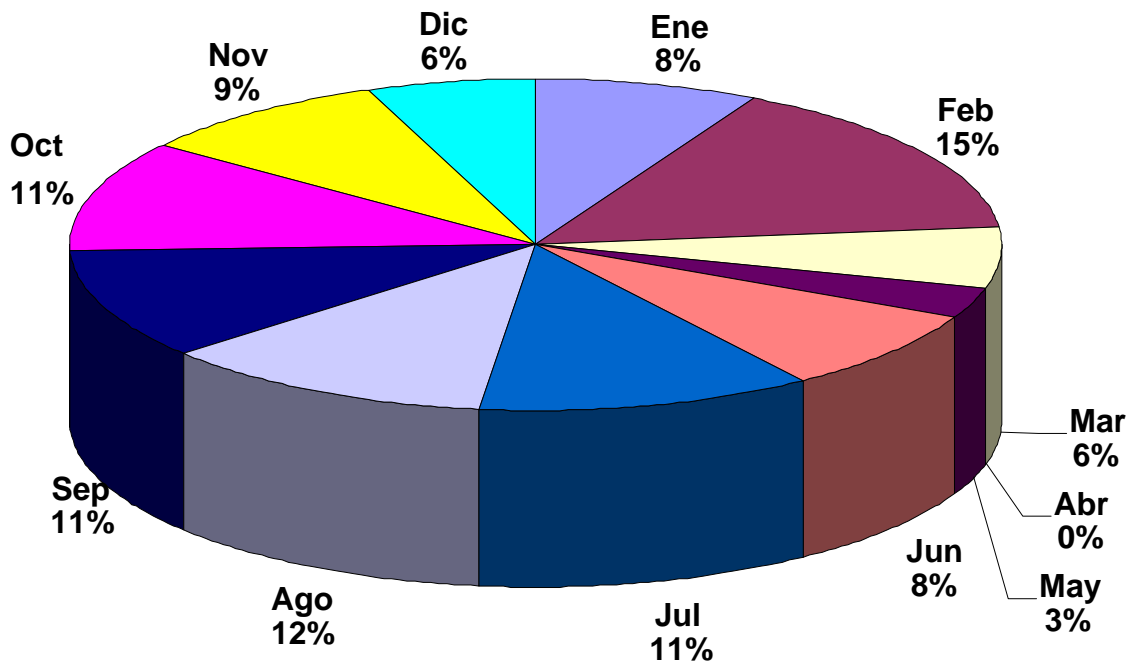


Figura 4.2. Distribución porcentual del comportamiento del TH (tiempo de humectación) durante el año 2003.

El clima en invierno presenta variaciones en periodos horarios, ocasionando que por la mañana y noche se presenten temperaturas cercanas a los 0°C, que es en el periodo en el cual una superficie metálica permanece húmeda y al medio día puede llegar a los 25°C, originando que la película formada en el metal disminuya su grosor y la velocidad de corrosión sea menor. En la época de verano, los rangos de temperatura van desde los 25°C por la mañana y noche, alrededor de los 45° C al mediodía y atardecer, originando que el metal este húmedo en ciertas zonas y no en su totalidad.

Para entender mejor la cinética de la corrosión se realizó un análisis de dos meses, uno de la época de invierno (febrero) y otro de verano (agosto) de la fracción parcial del tiempo de humectación (FPTH) en el año 2003. Al inicio del periodo del análisis fue menor la FPTH, en el mes de verano con 0.22, pero se incrementa a partir de las 3 a.m. y a las 9 a.m. a su máximo valor de 0.57, para luego empezar a descender hasta llegar a cerca de los 0 de las 12 p.m. a las 6 p.m. En el mes de febrero, se observaron valores iniciales de 0.25 de 1:00 a.m. a 3:00 a.m. y máximo de 0.38 a las 5:00 a.m. donde se mantuvo e inició un descenso a partir de las 8 a.m. y permanecer entre 0.1 y 0.2 y vuelve a incrementarse a partir de las 8 p.m. hasta un valor cercano a los 0.3 (Figura 4.3). Estos ciclos del TH indican el periodo de duración del proceso de corrosión generado en metales de equipos electrónicos y la formación de agentes corrosivos en sus conexiones y conectores eléctricos. La influencia de aire helado hace que la temperatura en una superficie metálica disminuya abajo del punto de rocío, con índices de humedad relativa mayores a 80% y se forme la película en el metal. Esto ocurre en Mexicali, originando la corrosión, que

también depende del tamaño, orientación y características de superficie donde ocurra el fenómeno.

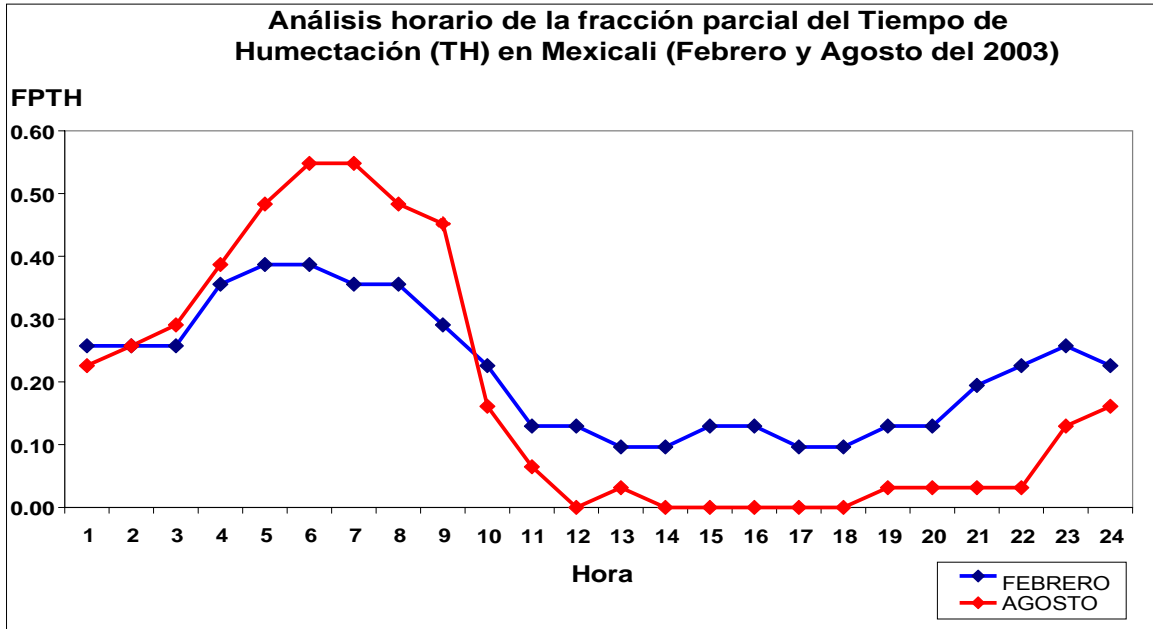


Figura 4.3. Fracción Parcial del Tiempo de Humectación-FPTH (Febrero y Agosto del 2003).

Con el estándar ISO 9223, se determinaron los niveles del tiempo de humectación, siendo T1 el de menor efecto y T5 el de mayor efecto en el deterioro de metales usados en la industria electrónica. En esta ciudad, aún cuando el tiempo de humectación presenta niveles desde T1 a T3 (en el periodo anual), y T1 y T2 en meses de febrero, agosto y noviembre, se genera la corrosión por variaciones climáticas de la región. El análisis anual muestra las horas donde se presentaron niveles máximos del TH siendo de las 5:00 a.m. a las 7:00 a.m. y en este periodo se obtuvieron además los promedios horarios, desviación estándar y mínimos, para conocer con más detalle el proceso de formación de la película en superficies metálicas de los materiales evaluados (Tabla 4.1). Esta evaluación se realizó para conocer los periodos en los cuales se debe de tener un mejor control de climas controlados en el interior de las plantas industriales.

Tabla 4.1. Evaluación del tiempo de humectación mensual y anual en Mexicali (ISO 9223).

Parámetros	Horas Pico Mensual	Meses Pico			Anual
	5, 6, 7AM (Frec.)	Febrero	Agosto	Noviembre	
Promedio	8, 9, 7 (T1)	7 - T1	6 - T1	4 - T1	63 -T2
Desv. Est.	4, 5, 5 (T1)	3.1 -T1	6.2 - T1	3.3 - T1	38.7 -T2
Mínima	1, 1, 0 (T1)	3 - T1	0 - T1	1 - T1	27 -T2
Máxima	15, 17, 17 (T2)	12 -T2	17- T2	10 -T2	134 - T2
Total	399 (T3)	163 - T2	135 - T2	104 - T2	1504 -T3

4.2 Los contaminantes del aire en Mexicali.

Se analizaron el NO₂, O₃ y SO₂ con rangos de 0.02µg/m³ hasta 0.76µg/m³, no siendo tomado en cuenta el CO por tener valores mayores a 1µg/m³ y menores a 10µg/m³ (Figura 4.4). Estos fueron monitoreados por las EMA y dieron información importante sobre la generación de corrosión en los metales usados en la industria electrónica, que fueron evaluados en este estudio.

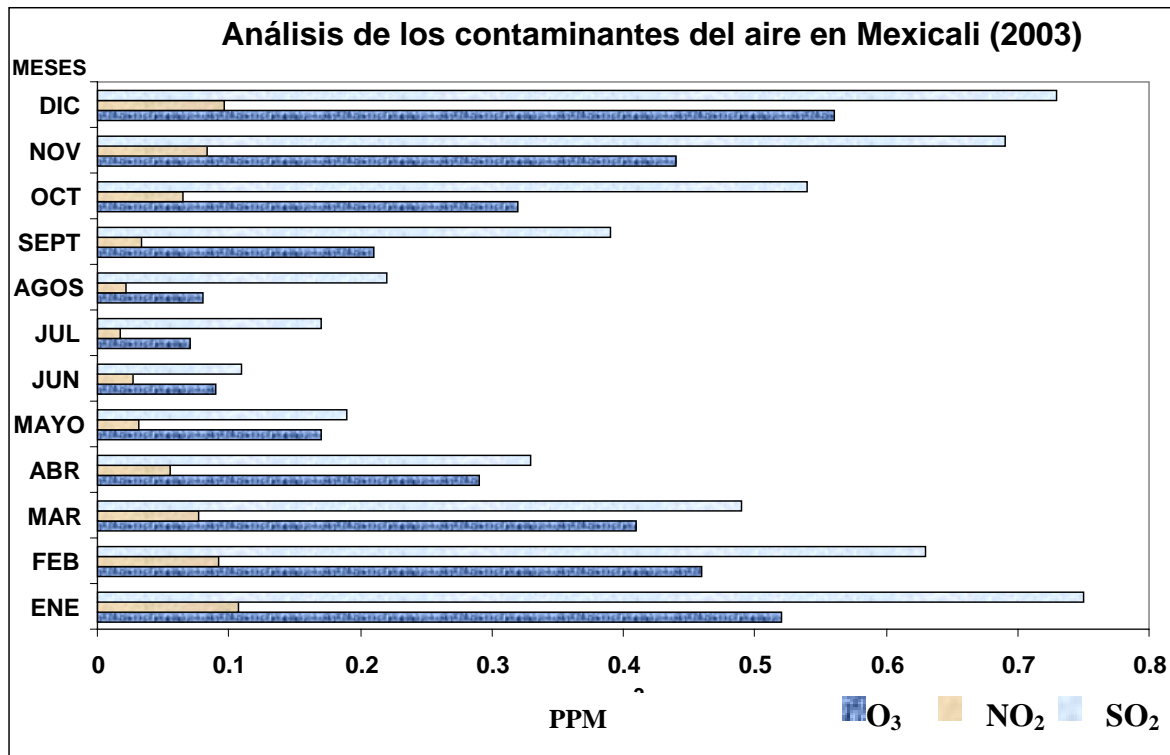


Figura 4.4. Evaluación de concentración mensual de contaminantes del aire en Mexicali (2003). Niveles estándar: NO_x (0.25 PPM/1hr), O₃ (0.09 PPM/1hr), y SO₂ (0.04ppm/24hr).

Los niveles más altos los presenta el SO_2 , le sigue el NO_2 y después el O_3 en la época de invierno donde los valores se incrementan hasta casi a 0.8ppm para el SO_2 , siendo su norma estándar de 0.04 ppm. Estas concentraciones penetran al interior y promueven la corrosión. La contaminación del aire varía por periodos horarios, diarios, semanales, mensuales y anuales, debido a las actividades en la ciudad, tanto del tráfico vehicular, como emisiones de la industria, el efecto invernadero y la dispersión de contaminantes en la atmósfera terrestre. La corrosión atmosférica en el interior de la industria electrónica se ha podido controlar pero no eliminar en los cuartos limpios, donde en repetidas ocasiones metales como el cobre presentan cambios en su superficie que indican el inicio de la corrosión. La corrosión atmosférica en condiciones de interior se reduce cuando se tienen microclimas controlados, con lo que se incrementa el rendimiento de los equipos electrónicos. En ambientes sin control del clima, la velocidad de corrosión se incrementa rápidamente, dañando los materiales metálicos. El deterioro de metales en el mes de febrero fue menor al de agosto, debido a temperaturas mayores a los 35°C . En invierno las concentraciones del SO_2 que tiene un gran efecto en el bajo rendimiento de equipos electrónicos, no se dispersan fácilmente hacia la atmósfera y se adhiere fácilmente a los metales. Sin embargo el proceso de corrosión que genera este contaminante es lento. Es por esto que las concentraciones de SO_2 fueron correlacionadas con niveles de humedad relativa y temperatura para conocer el grado de deterioro de los metales evaluados en los meses de febrero y agosto (Figuras 4.5 y 4.6). Se analizó la velocidad de corrosión de acuerdo a la influencia de los distintos agentes corrosivos en uniones y conexiones metálicas y fue mucho mayor en agosto que en febrero. En invierno se evaluó la

formación de la película húmeda y presencia de contaminantes corrosivos en metales, incluyendo sus índices de concentración en el aire.

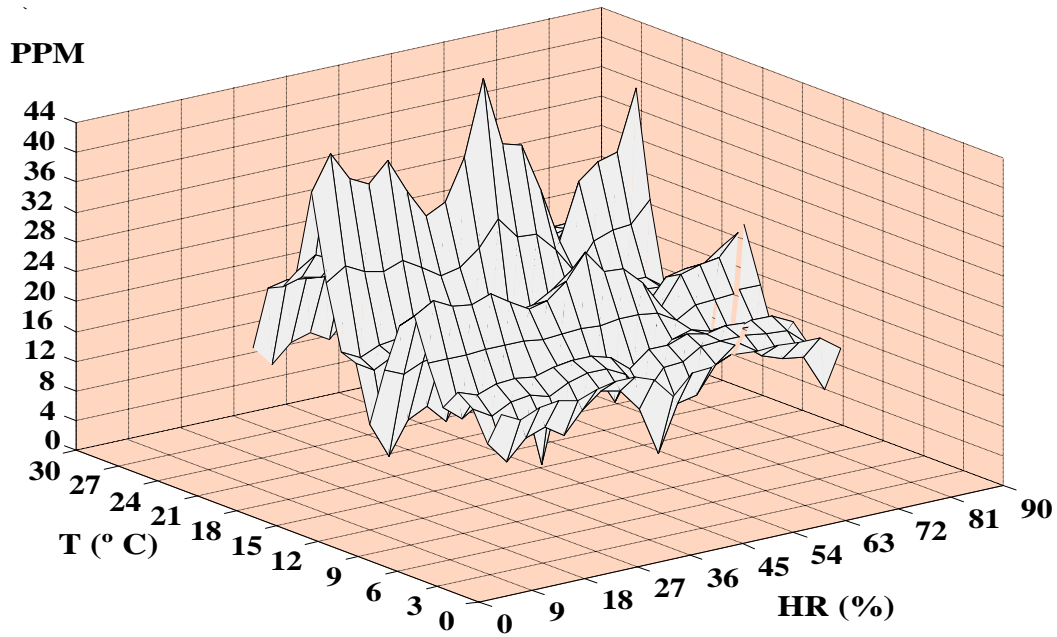


Figura 4.5. Correlación de velocidad de corrosión con los parámetros climáticos T y HR con el contaminante SO₂ en el mes de Febrero del 2003.

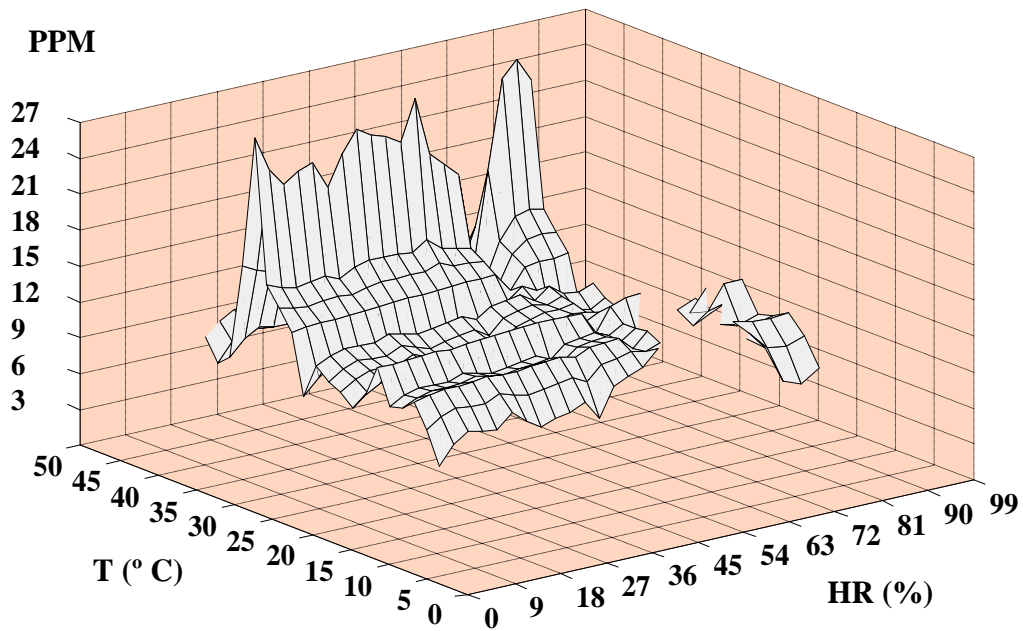


Figura 4.6. Correlación de velocidad de corrosión con los parámetros climáticos T y HR con el contaminante SO₂ en el mes de Agosto del 2003.

4.3 Análisis de probetas metálicas.

Al final de cada periodo de exposición las probetas metálicas se retiraron para el análisis de pérdida de peso, que consistió en pesar los especímenes con los productos de corrosión adheridos, para posteriormente remover dichos productos de corrosión con un baño de agua con jabón en un equipo ultrasónico por 5 minutos y un enjuague final de las probetas con etanol. Con este procedimiento se obtuvo el peso final para compararlo con el inicial, indicando la velocidad de corrosión de cada metal en función de no sólo la pérdida de peso sino también de la ganancia del mismo. Los resultados obtenidos son un promedio por triplicado de los especímenes expuestos en la cabina y en sitios específicos en diversas empresas. La superficie de los especímenes fue observada con un microscopio óptico para ubicar focos de corrosión localizada o definir si se trató o no de un proceso uniforme, encontrando en varios de los casos la presencia de picaduras.

4.4 La corrosión en la industria electrónica de Mexicali.

Los niveles de humedad relativa y temperatura fomentan el proceso e influyen en la velocidad de corrosión. En la época de verano la velocidad de corrosión se incrementó muy rápido a temperaturas en el rango de 30°C a 42°C y niveles de humedad relativa en el rango de 35% a 65% (Figura 4.7), en los especímenes expuestos en la cabina de simulación y en el interior de las empresas. Por otro lado, en el invierno, a temperaturas de 2°C a 12°C y niveles de humedad de 35% y 70%, se presentó una mayor incidencia de condensación de agua sobre la superficie metálica. En la figura 4.8 se puede observar una velocidad de corrosión mayor que se indica con color rojo y una menor con color azul cielo, mostrando los rangos anteriormente mencionados. La evaluación del cobre en

rangos de temperatura de 2°C a 13°C y humedad relativa de 34% a 70%, indicado por el color rojo es donde se presentan la velocidad de corrosión mayor y en algunos valores dispersos de T de 15°C a 20°C y HR de 45%, 75%,. A temperaturas de 23°C a 30°C, con niveles de humedad relativa de 30% y 75%, se observa el color azul cielo que muestra velocidades de corrosión bajas en los metales analizados.

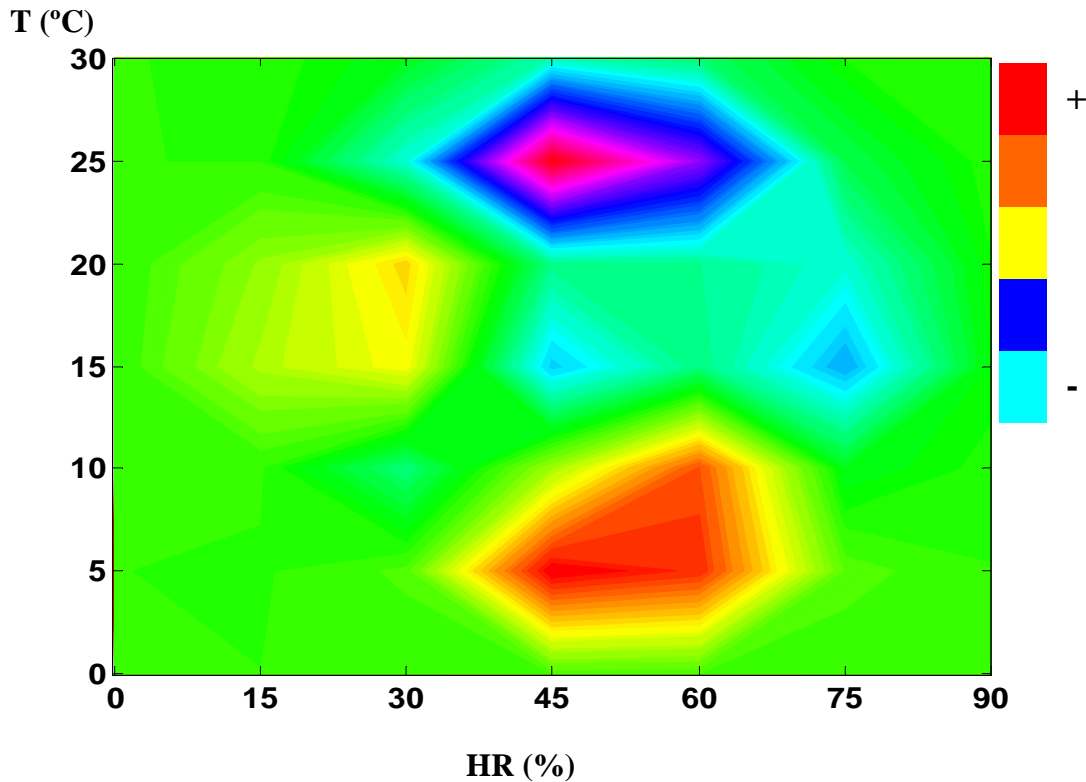


Figura 4.7. Análisis de corrosión del cobre expuesto en la cabina de simulación en invierno de 2003.

El análisis realizado en esta investigación en la época de verano para el cobre, indica que la velocidad de corrosión, a temperaturas menores a los 20 ° C es lenta. De los 20° C a los 35° C se empieza a incrementar y al ser mayor a los 35° C y menor a 39° C, la velocidad de corrosión aumenta considerablemente, estabilizándose a partir de los 40 ° C.

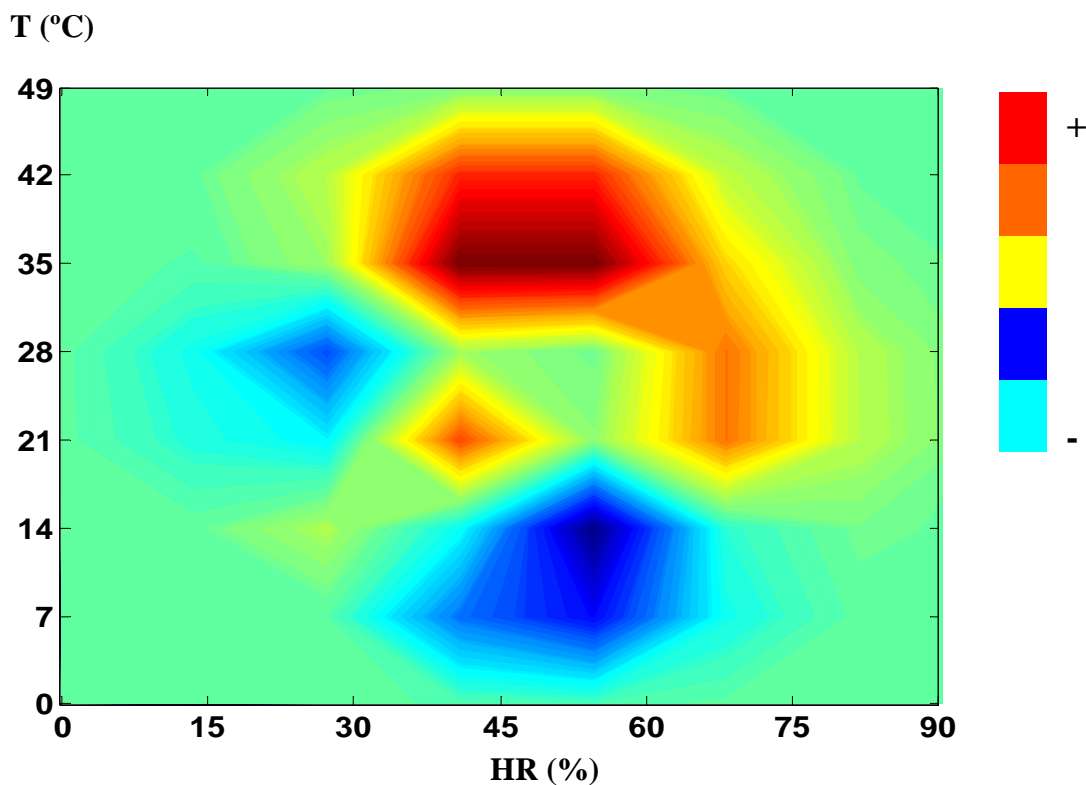


Figura 4.8. Análisis de corrosión del cobre expuesto en la cabina de simulación en verano de 2003.

4.5 Niveles de corrosividad.

Los niveles de corrosividad representan el grado de deterioro de los materiales en base a la correlación de la humedad relativa, temperatura y concentraciones de los contaminantes del aire: NO_x , SO_2 , O_3 y CO . Dependiendo de los factores climáticos y de la contaminación, se pudieron calcular los niveles de corrosividad de las probetas metálicas de cobre instaladas en la cabina de simulación, indicando que el SO_2 es el que aparece con mayor frecuencia, seguido del NO_x , CO y O_3 . A valores de humedad relativa de 30% a 50% y temperaturas de 25°C hasta 40°C, se observaron los índices de corrosividad mayores en el cobre, siendo éste fácilmente propenso a la generación de corrosión en la época de verano aún con niveles bajos de humedad como se muestra en la Figura 4.9. Este comportamiento se origina en los primeros días de exposición del cobre,

cuando aparecen pequeñas manchas en zonas aisladas y posteriormente ocurre el proceso de la corrosión por picaduras.

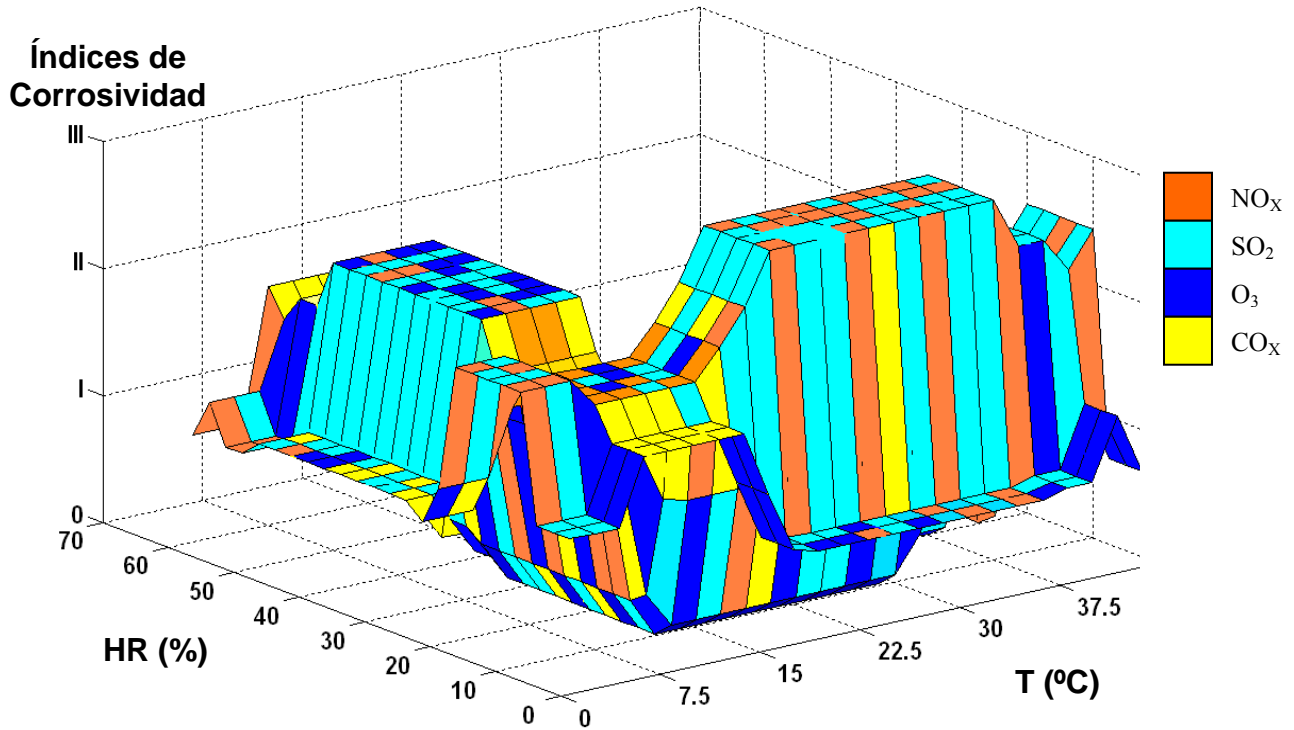
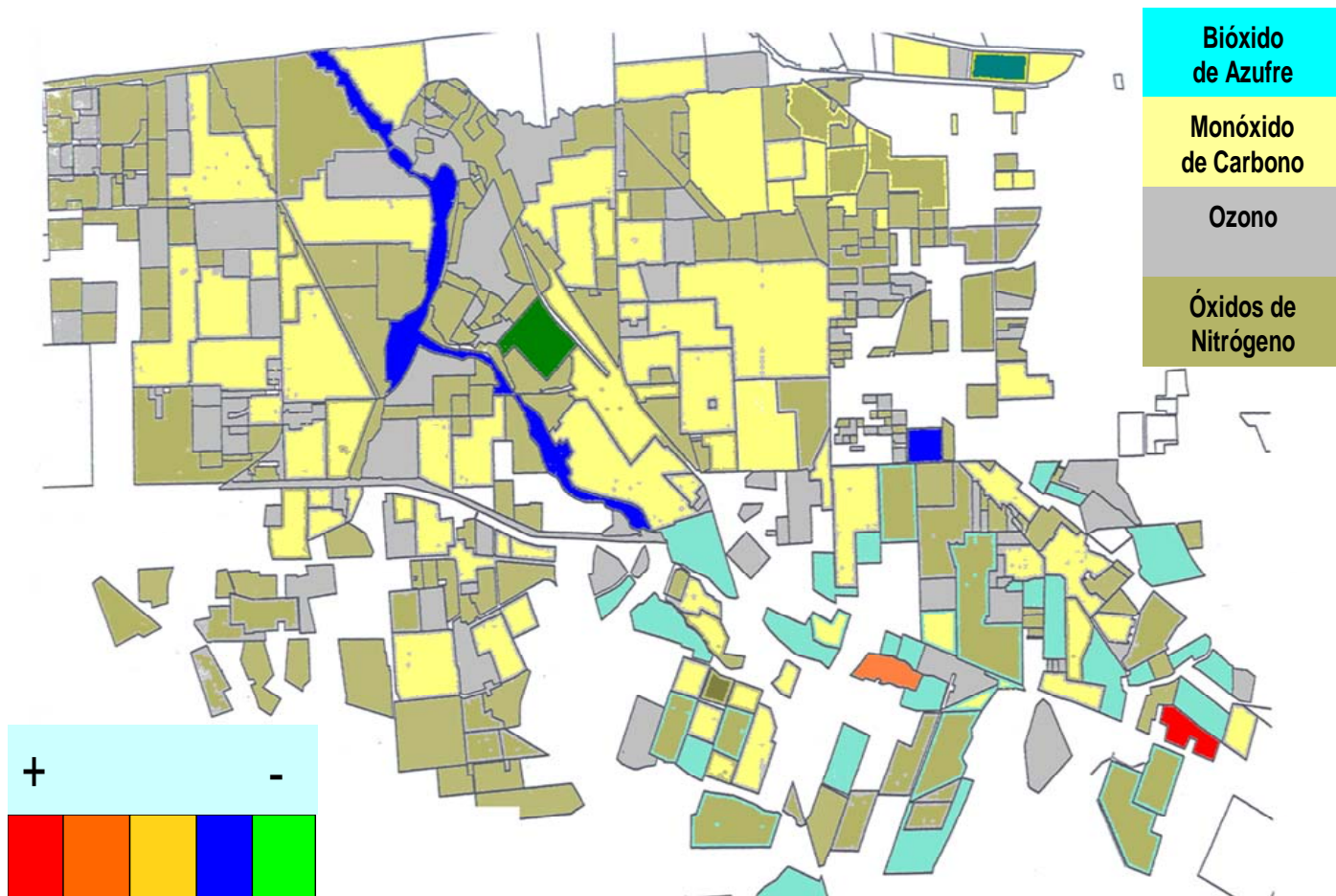


Figura 4.9. Correlación de factores climáticos de T, HR y contaminantes atmosféricos con los índices de corrosividad.

Existen fuentes de emisión de contaminantes del aire en ambientes exteriores que de acuerdo a la concentración de partículas y gases originan un nivel específico de agresividad, y tienen un efecto en el interior de plantas industriales en Mexicali (Figura 4.10). Las principales fuentes de emisión en la ciudad de Mexicali son de automóviles, la generación de tolvaneras por el polvo fino de campos agrícolas característico de una zona semi-árida y las emisiones de la geotermia en donde se genera y envía la electricidad a esta ciudad, donde se requieren de grandes cantidades de energía eléctrica, para las zonas residenciales, la industria e instituciones educativas y de gobierno.



FUENTES DE CONTAMINACIÓN QUE GENERAN CORROSIÓN ATMOSFÉRICA				
ACCURIDE (E1)	TELEPLAN (E2)	FURMEX (E3)	FEMSA (E4)	HONEYWELL (E5)
Cerro Prieto (15 Km.)	Cerro Prieto (20 Km.)	Polvo de Campos agrícolas	Vehículos	Vehículos
Proceso Industrial	Vehículos	Vehículos	Polvo de la ciudad	Polvo de la ciudad
Vehículos	Polvo de la ciudad	Polvo de la ciudad		
Polvo de la ciudad				

Figura 4.10. Fuentes de emisión de contaminantes del aire en la ciudad de Mexicali.

La dispersión de partículas contaminantes del aire es fácil, por la zona geográfica plana de la ciudad de Mexicali, por lo que aunque se emitan contaminantes atmosféricos en algunas zonas de la ciudad, se dispersan en la mayor parte de la región. Aún cuando las

autoridades gubernamentales de protección al medio ambiente a nivel federal, estatal y municipal, tienen planes de regulación y control, se siguen emitiendo gases contaminantes que generan ambientes agresivos aún en condiciones de interior de la industria electrónica. Se comparó la velocidad de corrosión en los metales evaluados en la cabina de simulación de ambientes interiores con aquellos expuestos en las plantas industriales, siendo más alta en las empresas, debido a la generación de ambientes capaces de favorecer el fenómeno de corrosión e incrementar rápidamente su velocidad. El acero al carbono fue el que sufrió un mayor deterioro en ambas condiciones, seguido de la plata, cobre, estaño y níquel como se puede observar en las Figuras 4.11 y 4.12.

Velocidad de corrosión de distintos metales expuestos en la cabina de simulación en el periodo comprendido de Abril del 2003 a Abril del 2005

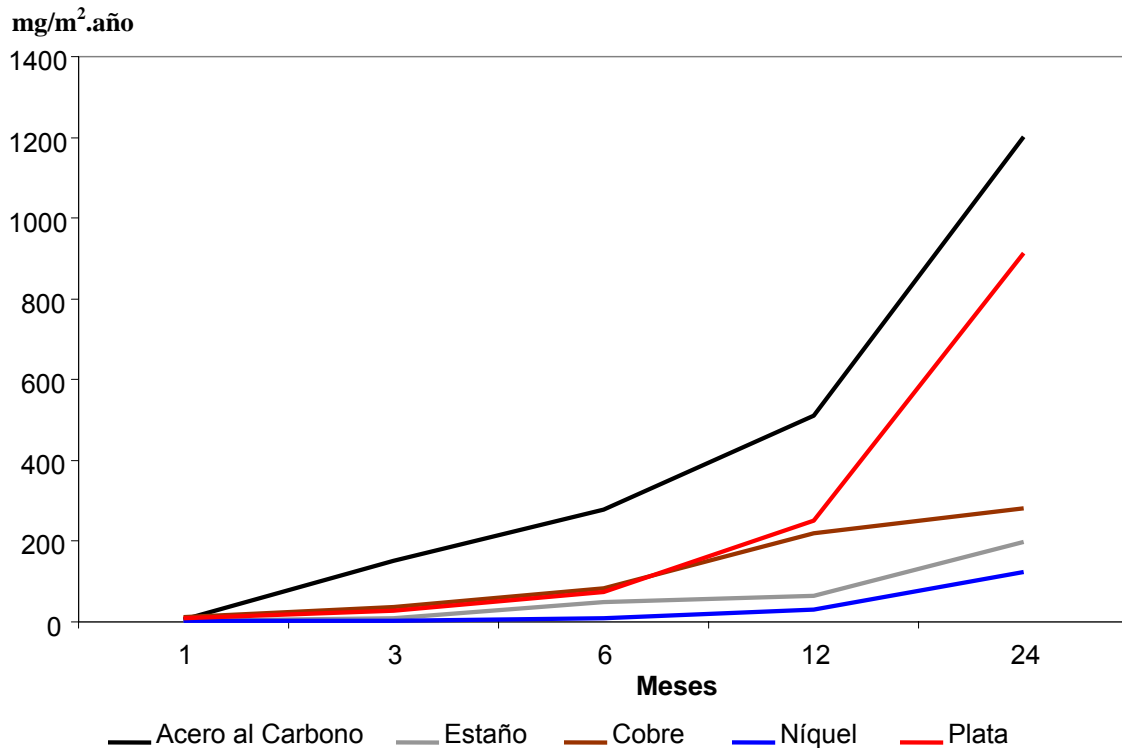


Figura 4.11. Análisis de la velocidad de corrosión de cinco distintos metales en la experimentación bajo condiciones simuladas en el periodo de 2003 a 2005.

Velocidad de corrosión de distintos metales expuestos en condiciones de interior en empresas en el periodo de Junio del 2005 a Septiembre del 2006

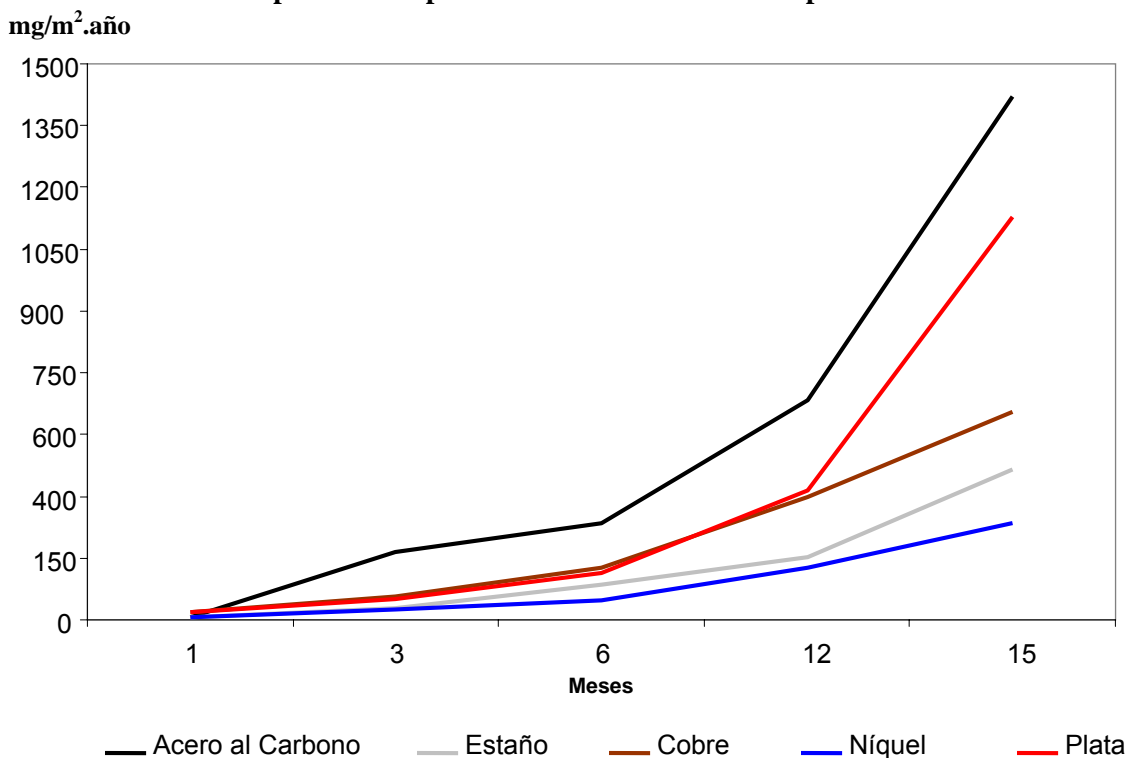


Figura 4.12. Análisis de la velocidad de corrosión de cinco distintos metales bajo condiciones interiores de la industria electrónica en el periodo de 2003 a 2005.

Aún cuando el tiempo de exposición en la cabina de simulación fue de 24 meses y en las empresas de sólo 15 meses, se encontró que en el interior de las plantas industriales el deterioro de los metales fué mayor que en la cabina de simulación. Esto ocurrió porque en las zonas donde están instaladas las empresas en la ciudad de Mexicali, estas son afectadas por un mayor grado de contaminación. A esto podemos agregar las emisiones de diversos procesos en el interior de las compañías del ramo electrónico, donde se llevaron a cabo los experimentos. En cambio, en la cabina de simulación, los contaminantes atmosféricos adheridos a los metales evaluados, son de fuentes de menor

grado de contaminación y no se generaron otro tipo de contaminantes del aire en su interior, durante todo el tiempo que duraron los ensayos.

4.6 Monitoreo de sulfatos por medio de la técnica de platos de sulfatación.

La concentración de sulfuros colectados en los platos de sulfatación usados en el proceso experimental, se analizó para obtener los niveles de SO_4 en interiores de plantas industriales, y con ello poder conocer con mayor exactitud su concentración y efecto en uniones y conexiones metálicas de equipos electrónicos.

Los sulfatos fueron precipitados con cloruro de bario y se analizó su contenido utilizando un espectrofotómetro ultravioleta visible marca Perkin Elmer modelo Lambda 25. Se instalaron cinco platos en la empresa Accuride Int., en diferentes áreas: almacén, producción, zona de embarques y un testigo en calidad de blanco en las oficinas administrativas, aislándolo del ambiente con plástico. Los datos obtenidos de los platos colocados para monitorear el interior de las plantas industriales durante periodos de 28, 29 y 30 días, se compararon con las concentraciones medidas y registradas por las EMA ubicadas en la ciudad de Mexicali (Tabla 4.2). Es importante señalar que en todos los casos donde se aplicó esta técnica, se reciben emisiones de sulfuros provenientes del campo geotérmico de Cerro Prieto y la EMA más cercana se encuentra a unos 10kms de distancia.

Tabla 4.2. Niveles de concentración de SO₂ medidos con la técnica de platos de sulfatación en la planta Accuride Internacional en el periodo de Febrero a Septiembre del 2007.

Mes	Días	SO₂, ppm Plato de sulfatación	SO₂, ppm EMA US-EPA
Febrero	28	0.045	0.32
Abril	29	0.49	0.54
Julio	30	0.29	0.33
Septiembre	28	0.14	0.11

4.7 Prueba de la vela húmeda para detectar cloruros.

En la empresa TELEPLAN se instalaron cinco dispositivos en el interior de diferentes áreas: dos en el almacén de materiales, dos en la zona de procesos de manufactura y una en oficinas administrativas para ser utilizada como blanco de referencia. La prueba experimental se realizó en cuatro meses diferentes del 2006, obteniendo la concentración de cloruros en el interior de la planta del ramo electrónico. La tabla 4.3 muestra los valores de concentración promedio mensual obtenida en las cuatro compañías de monitoreo de ión cloruro utilizando el método de la vela húmeda.

Tabla 4.3. Concentración de cloruros medidos con la método de la vela húmeda en la planta Teleplan en el periodo de Febrero a Septiembre del 2006.

Mes	Días	Cl, mg /m² .día
Febrero	26	17.6
Abril	28	6.8
Julio	28	12.3
Septiembre	25	8.9

4.8 Corrosión atmosférica en condiciones de interior.

4.8.1 Corrosión de probetas metálicas en la cabina de simulación y ambientes interiores de la industria electrónica.

a) Cobre.

La corrosión del cobre y sus aleaciones en interiores es muy estudiada por ser un material muy utilizado en conectores de sistemas electrónicos, que son la base de las tecnologías modernas. El fenómeno corrosivo en contactos metálicos de cobre, origina resistencia de conexión eléctrica y con ello se generan las fallas eléctricas de los dispositivos y equipos electrónicos. Es importante estudiar el mecanismo de corrosión del cobre desde los periodos iniciales de exposición. Los contaminantes del aire que más interactúan con las superficies de cobre son el SO₂ y el H₂S, los cuales aunados a las variaciones de humedad y temperatura, forman películas húmedas en el cobre, generando productos de corrosión compuestos entre otros por sulfuro de cobre (Cu₂S). Una de las etapas de corrosión del cobre ocurre cuando la humedad relativa y concentraciones de SO₂ presentan valores mayores al 80% y a los estándares de calidad del aire de la región, indicando que el origen de la corrosión depende del estado de la superficie metálica (lisa y corrugada,

pulida o sin pulir, uniforme y no-uniforme). En ocasiones se forma una película de Cu_2O para que no se siga corroyendo el metal y el óxido formado en un día retarda la velocidad de corrosión del metal. La película de Cu_2O se disuelve gradualmente en presencia de un electrolítico ácido que se forma por la presencia de SO_2 . Los productos de corrosión son de diferentes estructuras debido a superficies uniformes o no-uniformes. A niveles mayores a 20 ppm de SO_2 , en combinación con el NO_2 y O_3 a diferentes concentraciones en el interior de las plantas industriales, se observó en una simulación matemática con MATLAB, la formación de productos de cobre como las cupritas (Cu_2O) y algunos sulfatos con ambas mezclas como $\text{SO}_2 + \text{NO}_2$ y $\text{SO}_2 + \text{O}_3$. El proceso de corrosión es de manera uniforme y se incrementa con la presencia de vapor de ácido acético que forman cupritas y acetato de cobre. El comportamiento de la velocidad de corrosión tiene una tendencia parabólica, donde los datos de la ganancia de peso fueron mayores que la pérdida de peso. Con la pérdida de peso se obtiene la velocidad de corrosión, que determina el grado de deterioro de las probetas evaluadas en esta investigación y el tipo de corrosión en cada metal. La velocidad de corrosión de este metal en interiores es menor que en exteriores, y se debe principalmente a la concentración de sulfuros, que fue de hasta $219 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{año}$, similar a las muestras de plata (Figura 4.13). Para realizar una evaluación comparativa se muestra un análisis de EDS de una probeta metálica de cobre limpio antes de exponerse a las condiciones necesarias que origina la corrosión en metales. (Figura 4.14). Los análisis de superficie por microscopia electrónica de barrido (SEM) revelan que la corrosión fue de tipo uniforme en su mayor parte y localizada en pequeñas zonas (Figura 4.15). Las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 muestran los análisis de los productos de corrosión formados en la superficie metálica del cobre, en el periodo de 2

años siendo los principales compuestos además de la cuprita (Cu_2O), sulfuros de cobre (CuS y Cu_2S), donde se observan a diferentes magnificaciones la morfología de productos de corrosión formados en especímenes metálicos expuestos tanto en la cabina de simulación como en la empresa ACCURIDE INT. La estructura cristalina de tipo hexagonal de los productos de corrosión mostrados de manera oscura, forman el monosulfuro de cobre (CuS), también llamado covelita (Figura 4.17); generado por la presencia de ácido sulfhídrico. La covelita se forma a una temperatura mayor a los 30°C , que se presentan en la ciudad de Mexicali tanto en verano como en invierno. Otro compuesto binario es el formado por sulfuro de cobre (Cu_2S), también llamado calcocita. Su composición consiste de 0.5% a 2% de CuS , incluyendo algunos compuestos no estequiométricos, que de acuerdo a su porcentaje constituyen algunos compuestos binarios de cobre y azufre, siendo además de CuS y el Cu_2S , algunos los siguientes: Cu_9S_8 ($\text{Cu}_{1.12}\text{S}$) llamado yarroowita, $\text{Cu}_{39}\text{S}_{28}$ ($\text{Cu}_{1.39}\text{S}$) llamado espiocopita, Cu_8S_5 ($\text{Cu}_{1.6}\text{S}$) llamado geerita, Cu_7S_4 ($\text{Cu}_{1.75}\text{S}$) llamado anilita, Cu_9S_5 ($\text{Cu}_{1.8}\text{S}$) llamado digenita y $\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$ ($\text{Cu}_{1.96}\text{S}$) llamado djurleita.

Los resultados obtenidos mediante el análisis de superficie con SEM y EDS, comprueban que inicialmente la superficie de cobre es cubierta por una película delgada de óxido de cobre, que se forma por efecto combinado de la humedad y el oxígeno presentes en el ambiente atmosférico, y en ausencia de ácido sulfhídrico (H_2S). Esta película de óxido es capaz de proteger al metal de la corrosión por sulfuros provenientes del H_2S , siempre y cuando la humedad relativa tenga valores bajos (menores a 30 o 35%). Los resultados de análisis químico por EDX muestran que la formación de sulfuros de cobre como producto de la corrosión es de composición heterogénea y no estequiométricamente bien definida,

por lo cual tenemos una fórmula química del tipo Cu_xS , donde x tiene valores en el rango de 1.6 a 2. Los compuestos obtenidos en orden decreciente respecto al contenido en cobre se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Sulfuros de cobre encontrados en la película de corrosión por sulfidación de superficies metálicas de cobre expuestas en condiciones atmosféricas de Mexicali durante 2007.

Composición química	Nombre del mineral
Cu_2S	Calcocita
$\text{Cu}_{1.95}\text{S}$	Djurlita
$\text{Cu}_{1.82}\text{S}$	Digenita
$\text{Cu}_{1.62}\text{S}$	Geerita

Mecanismo de formación de las películas de corrosión de cobre por sulfuros.

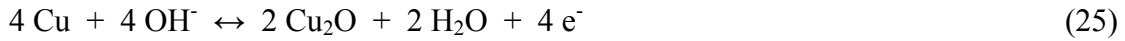
El oxígeno del aire se reduce sobre la superficie de cobre en presencia de humedad de acuerdo a la siguiente ecuación:



Esta reacción catódica de reducción requiere de electrones que son proveídos por una reacción anódica complementaria de oxidación del cobre metálico.



En el equilibrio tenemos entonces la formación de un primer producto de corrosión que es un óxido de cobre y el cual esta sujeto a condiciones de una $RH < 30\%$. Esta película de Cu_2O se forma de acuerdo a la siguiente ecuación:



Posteriormente, en presencia de H_2S y humedad relativa con valores de 35 a 75%, es decir hasta condiciones críticas que favorecen el tiempo de humectación, el proceso de corrosión de la superficie de cobre metálico por sulfuros ocurre de la siguiente manera:

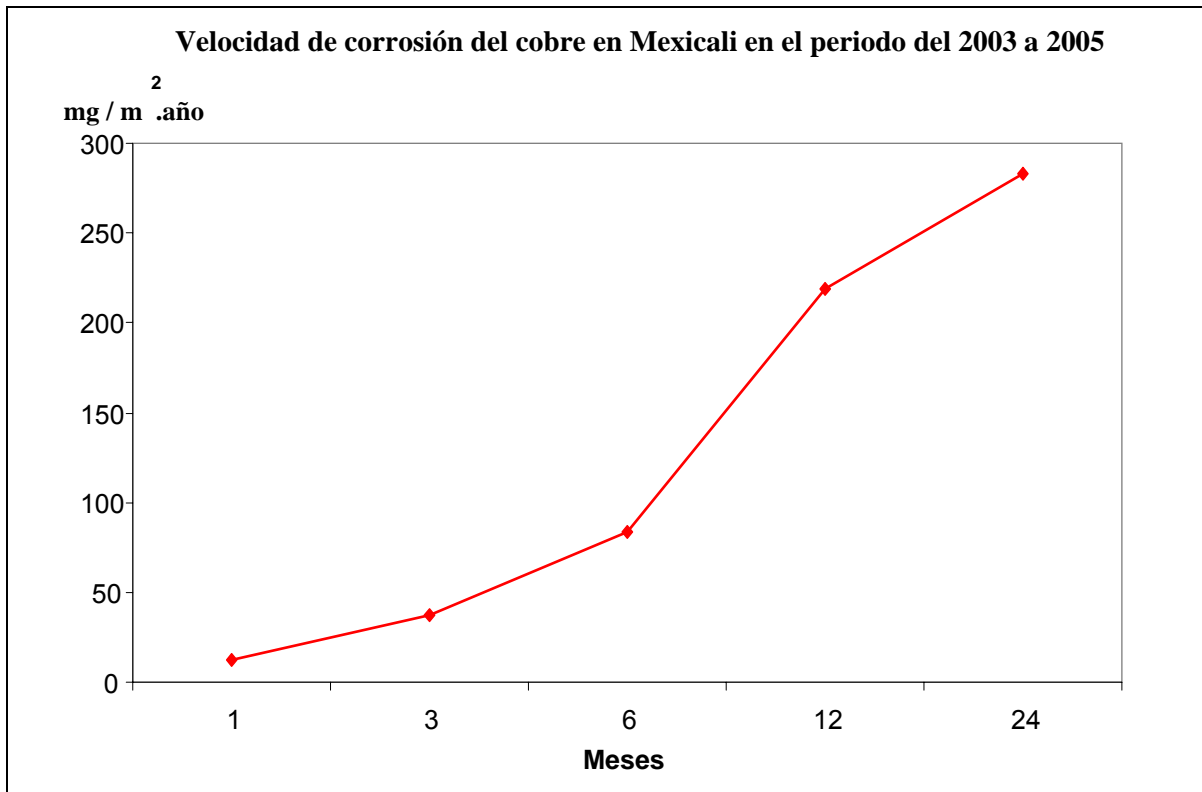


Figura 4.13. Evaluación de velocidad de corrosión del cobre en el periodo 2003 a 2005.

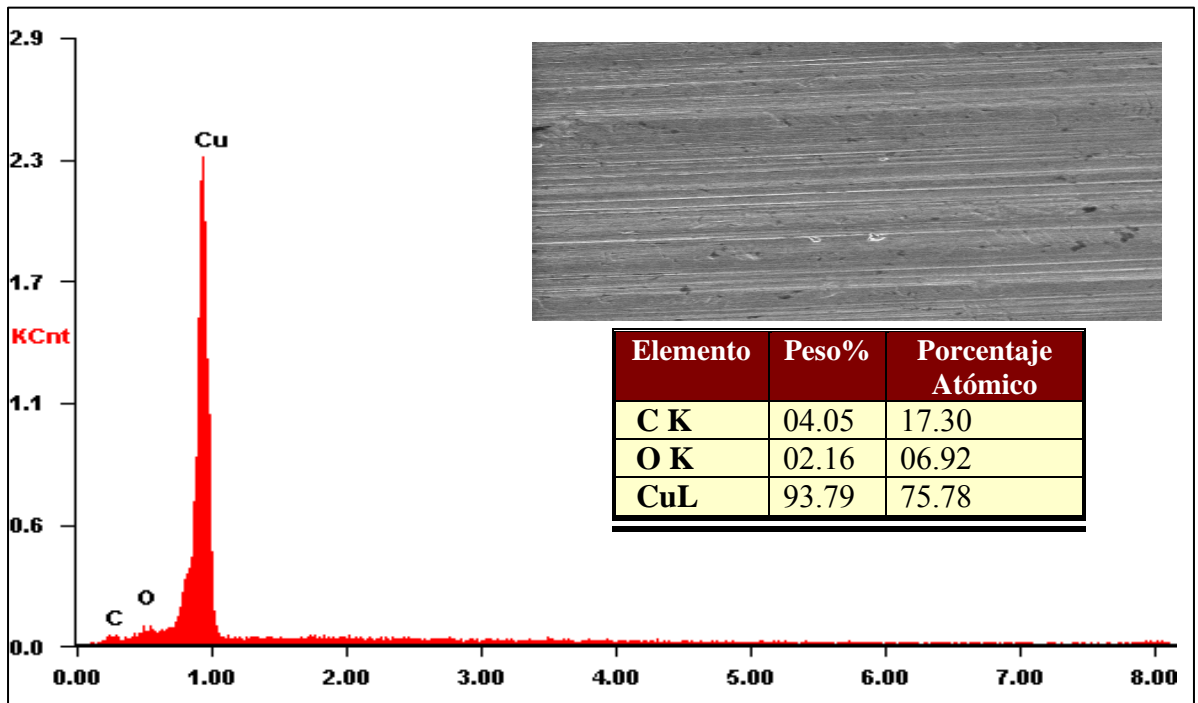


Figura 4.14. Análisis de EDS del cobre antes de la exposición para el estudio.

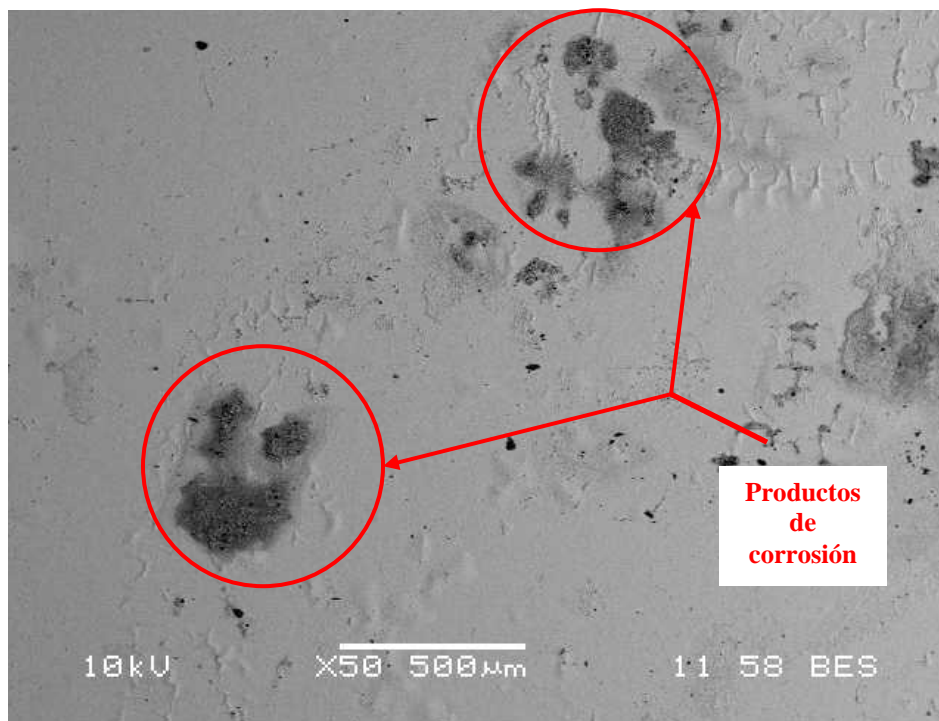


Figura 4.15. Micrografía por SEM (X50) sobre una superficie del cobre a los seis meses de exposición en la cabina de simulación.

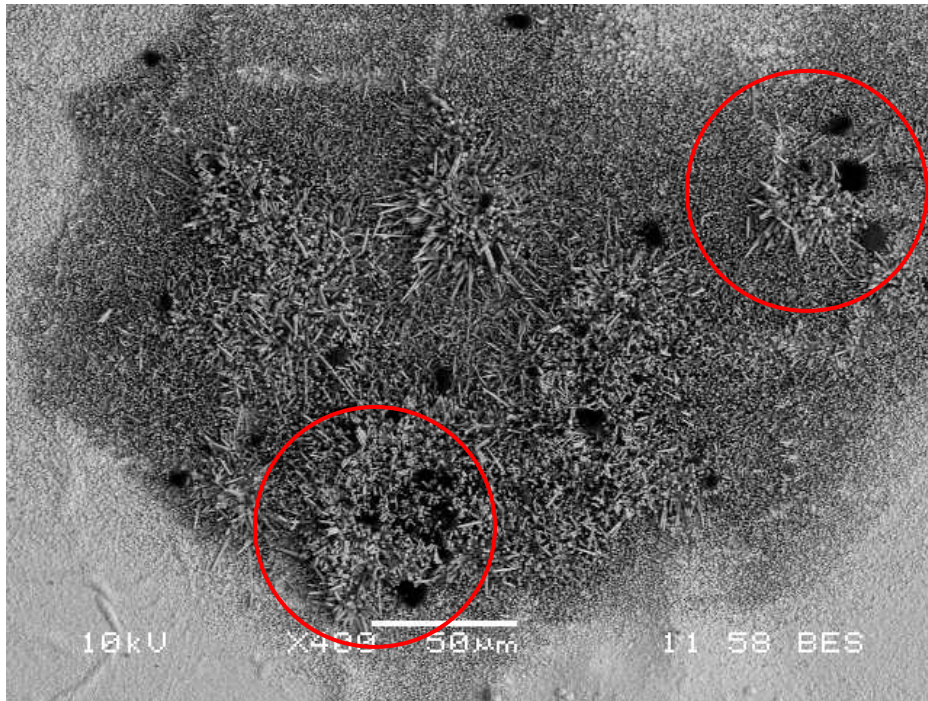


Figura 4.16 Micrografía por SEM (X400) sobre una superficie de cobre a los seis meses de exposición en la empresa Accuride Int.

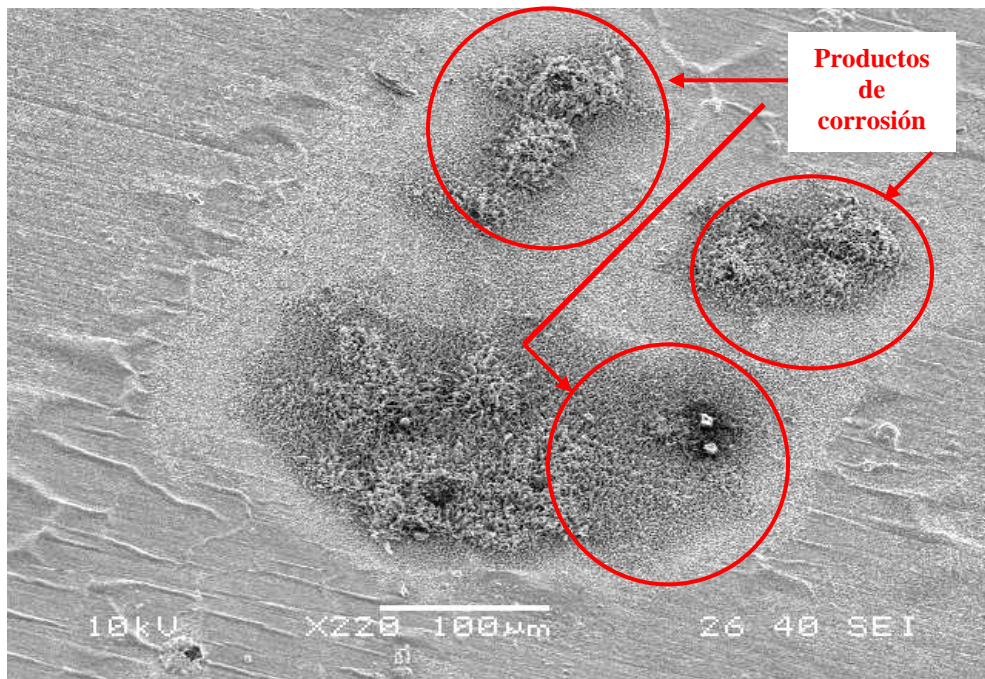


Figura 4.17. Micrografía por SEM (X220) sobre una superficie de cobre al año de exposición en la cabina de simulación.

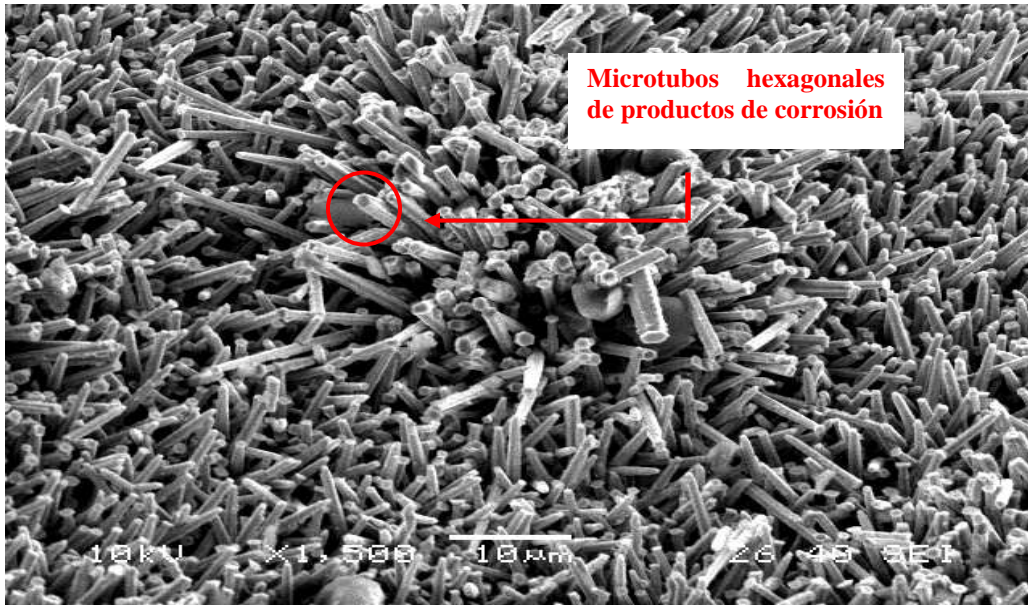


Figura 4.18. Micrografía por SEM (X1500) que muestra los productos de corrosión sobre una superficie de cobre al año de exposición en la empresa FEMSA.

El análisis EDX muestra la composición de los productos de corrosión formados en la superficie del cobre, donde el azufre como parte de los sulfuros que se presentan con mayor frecuencia en este metal (Figura 4.19).

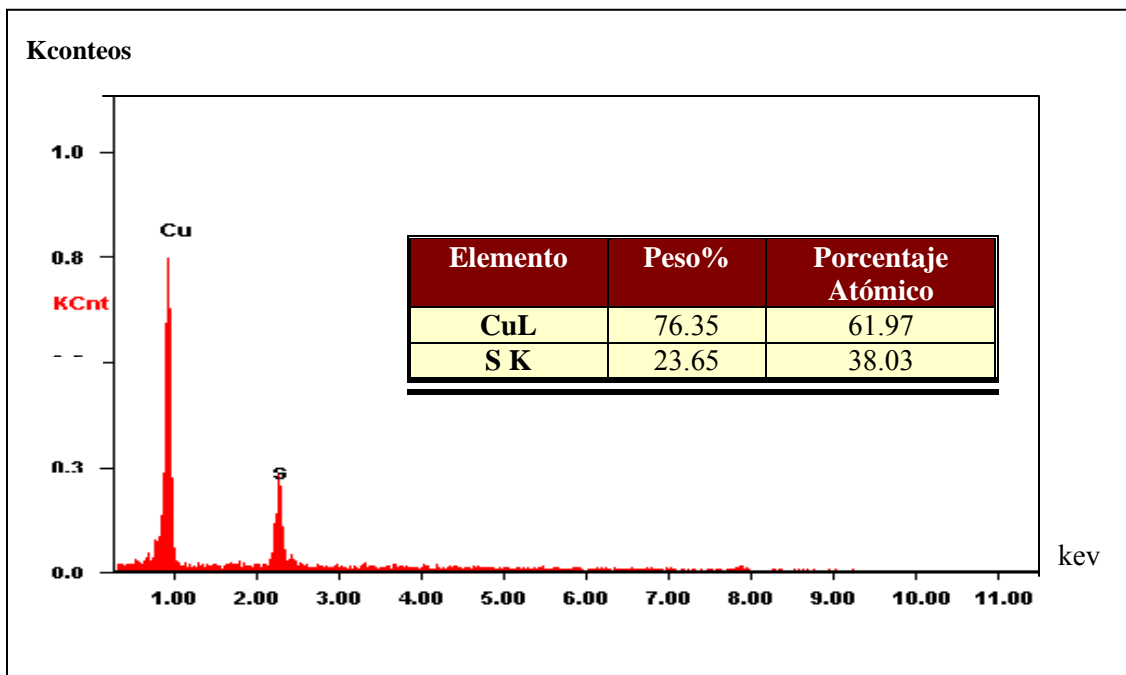


Figura 4.19. Análisis de EDS del cobre a los seis meses de exposición en la cabina de simulación.

b) Estaño.

La exposición de probetas de estaño a ambientes corrosivos, originan la formación de películas compuestas de óxido estaño. La corrosión anual del estaño que resultó de las mediciones experimentales en esta investigación fue de 34 mg/m².año (Figura 4.20). Los análisis de SEM-EDS indican que la composición elemental de los productos de corrosión son C, O₂, N y S principalmente y en menor concentración se observó la presencia de Cl y Si. El análisis de superficie realizado con la técnica de Espectroscopia de fotoelectrones de Rayos X (Figuras 4.21, 4.22 y 4.23), confirma los resultados del análisis del SEM-EDS mostrados en las figuras 4.24, 4.25 y 4.26, indicando cuales son los principales elementos adheridos a la superficie del estaño.

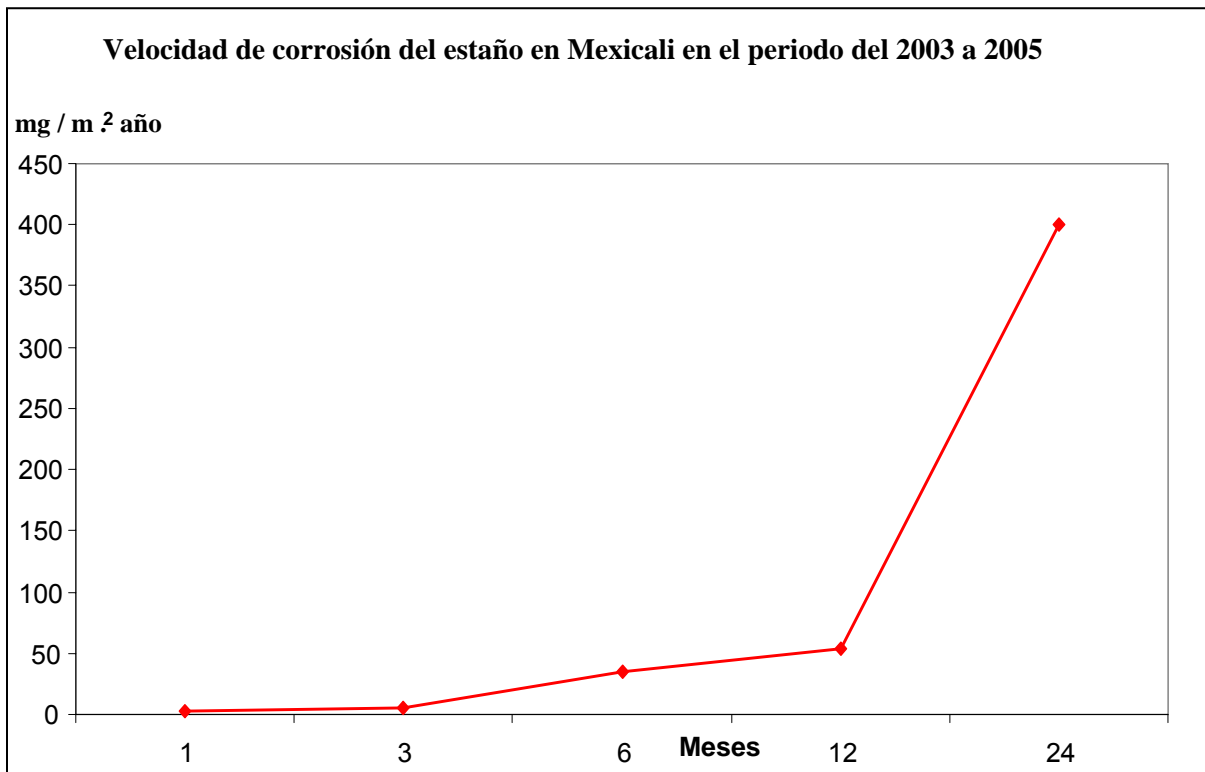
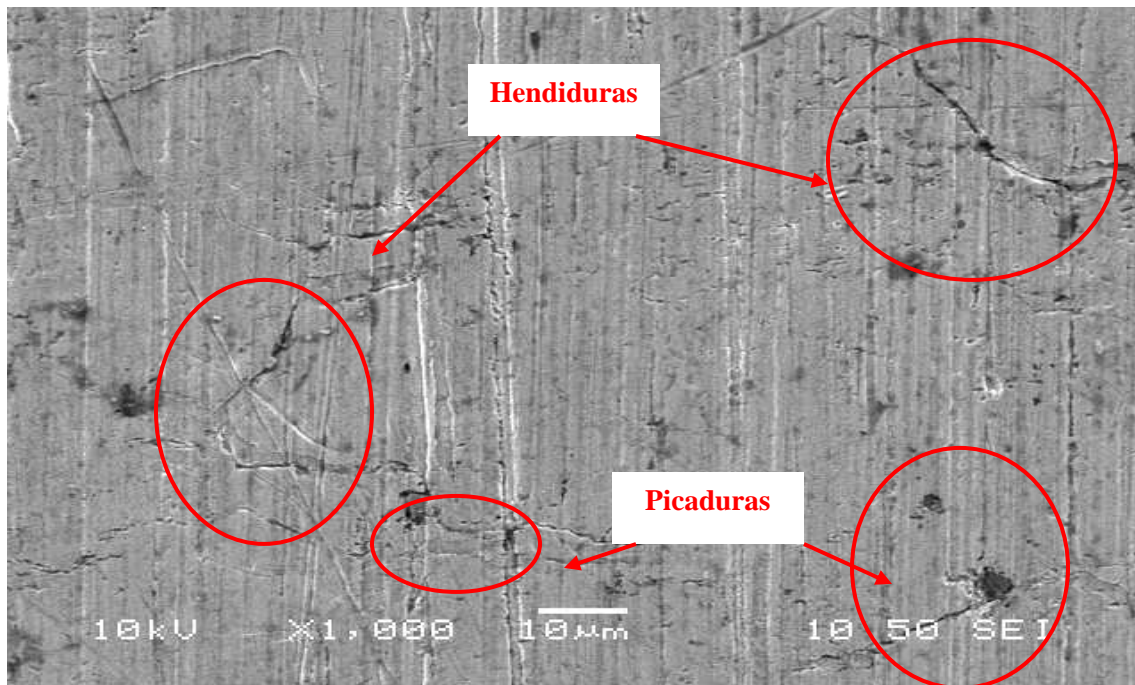


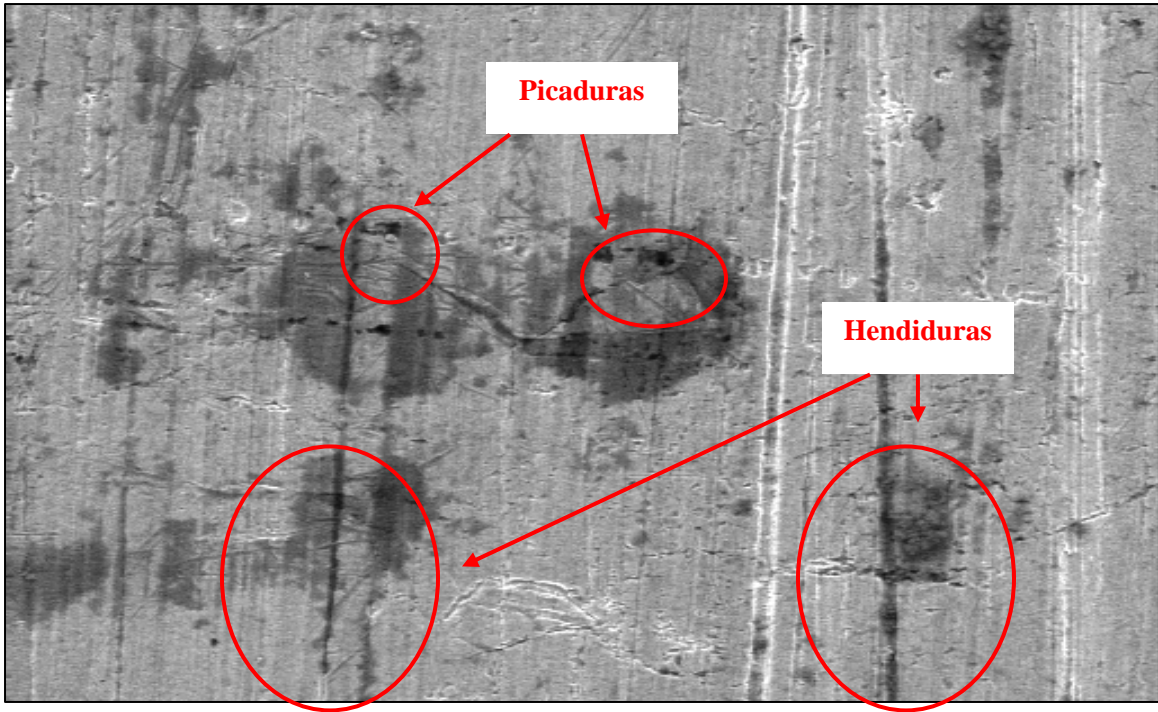
Figura 4.20. Evaluación de velocidad de corrosión del estaño (2003 - 2005).



4.21 Micrografía de SEM (X500) sobre una superficie del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición la cabina de simulación.



4.22 Micrografía de SEM (X500) sobre una superficie del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición la empresa FURMEX.



4.23 Micrografía de SEM (X500) de manchas sobre una superficie del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición el cuarto limpio de la empresa TELEPLAN.

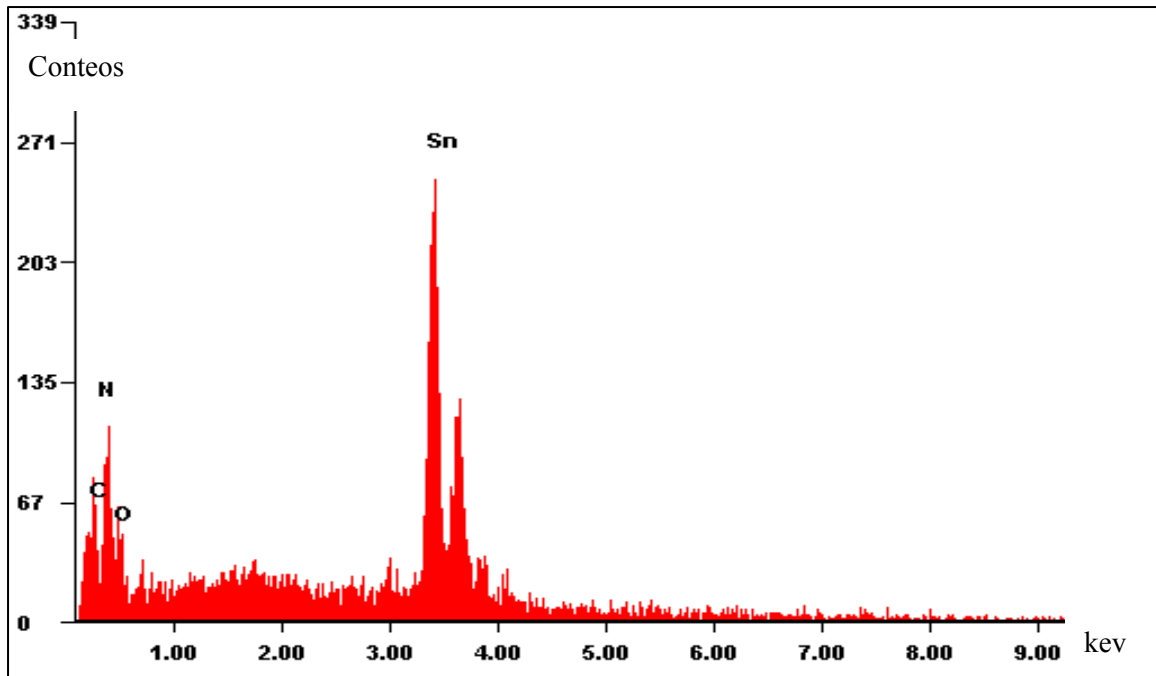


Figura 4.24. Análisis de EDS del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición en la cabina de simulación.

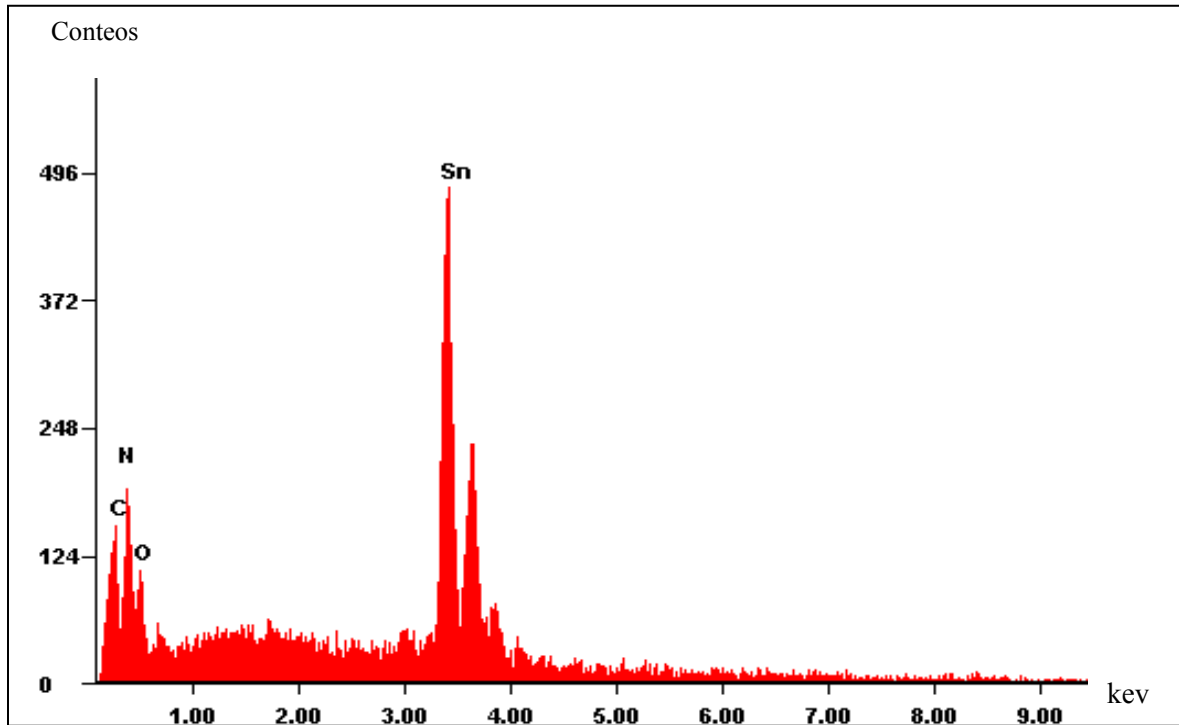


Figura 4.25. Análisis de EDS del estaño en Mexicali a los seis meses de exposición en la empresa FURMEX.

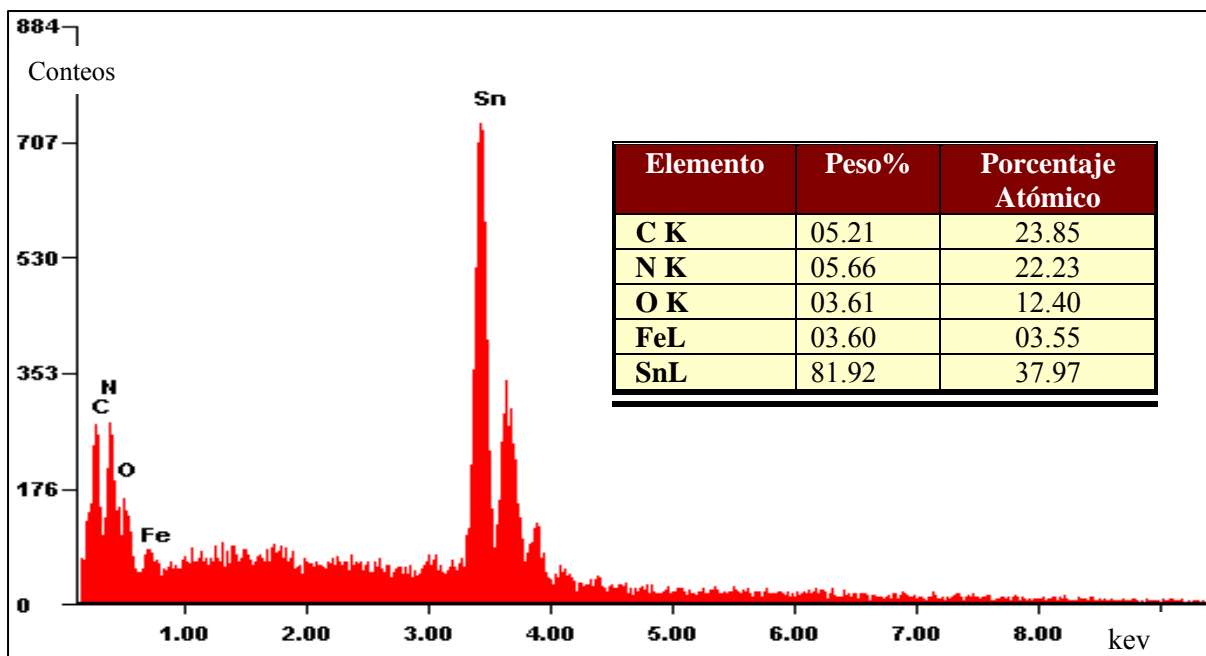


Figura 4.26. Análisis de EDS del estaño en Mexicali al año de exposición en la empresa TELEPLAN.

Durante los experimentos de cinética de corrosión del estaño, los niveles de humedad relativa alcanzaron hasta el 85% y las concentraciones de SO_2 variaron de 10 a 22 ppm. La película de óxido formada en la superficie metálica es de SnO_2 y nitratos. La ganancia de peso en este metal no muestra una buena correlación de la velocidad de corrosión con los contaminantes del aire analizados en las estaciones de la ciudad, pero si se observó que los cloruros tienen un efecto en la corrosión del estaño. Esto se debe a que aun a bajos niveles de Cl^- , se rompe la película de óxido que cubre al metal y se inicia el proceso de la corrosión localizada.

c). Níquel.

Los electrodepositos de níquel se usan con frecuencia en los conectores de bajo voltaje, como barrera de difusión entre el cobre y sus aleaciones con el oro poroso. La oxidación espontánea del níquel produce un óxido (NiO , que es un semiconductor tipo-p con un catión deficiente, como el Ni_{1-x}O), sobre el metal. A temperatura ambiente y 85% de humedad relativa, el espesor del óxido formado en este metal es menor a 1 nm y puede llegar a 3 nm con temperaturas y humedad relativa más altas. La curva de velocidad de corrosión obedece a un comportamiento logarítmico. En ausencia de vapor de agua, la oxidación del níquel disminuye y se forma una mono-película de NiO . Las presiones parciales de SO_2 , Cl_2 , NO_2 y NH_3 , son factores que influyen drásticamente en la velocidad de corrosión de este metal, pero el H_2S y el O_3 , no tienen gran influencia, con una tendencia logarítmica. Cuando se expone el níquel en atmósferas húmedas que contienen SO_2 , el metal se cubre con una película de sulfato de níquel y al reaccionar con el O_2 , se obtiene trióxido de azufre (SO_3). La corrosión anual del níquel en el periodo de

evaluación de los 2 años, fue menor que la registrada para la plata y el cobre (Figura 4.27).

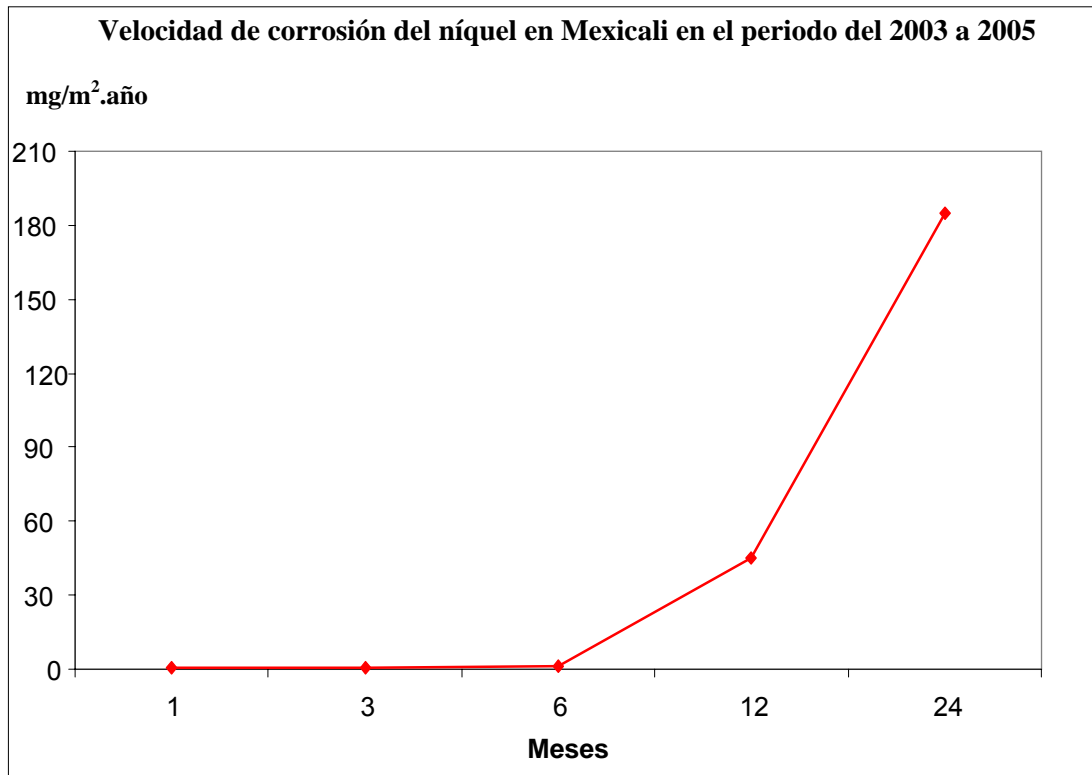


Figura 4.27. Evaluación de velocidad de corrosión del níquel (2003 - 2005).

La cinética de corrosión del cobre y níquel en equipos telefónicos en oficinas y sin aire acondicionado, se obtiene con la medición de películas delgadas de óxido de níquel, los especímenes metálicos observados durante el periodo de 2 años de exposición a ambientes agresivos, teniendo una tendencia parabólica. Los análisis de SEM-EDS muestran la presencia de áreas oscuras y grises en la superficie metálica, después del periodo de exposición, con agentes corrosivos en mayor cantidad de C, O₂ y en menor cantidad Cl, S, Si y K. Posiblemente esas impurezas de los elementos mencionados, forman áreas catódicas y debido a esto se genera corrosión localizada por picaduras (Figuras 4.28 y 4.29).

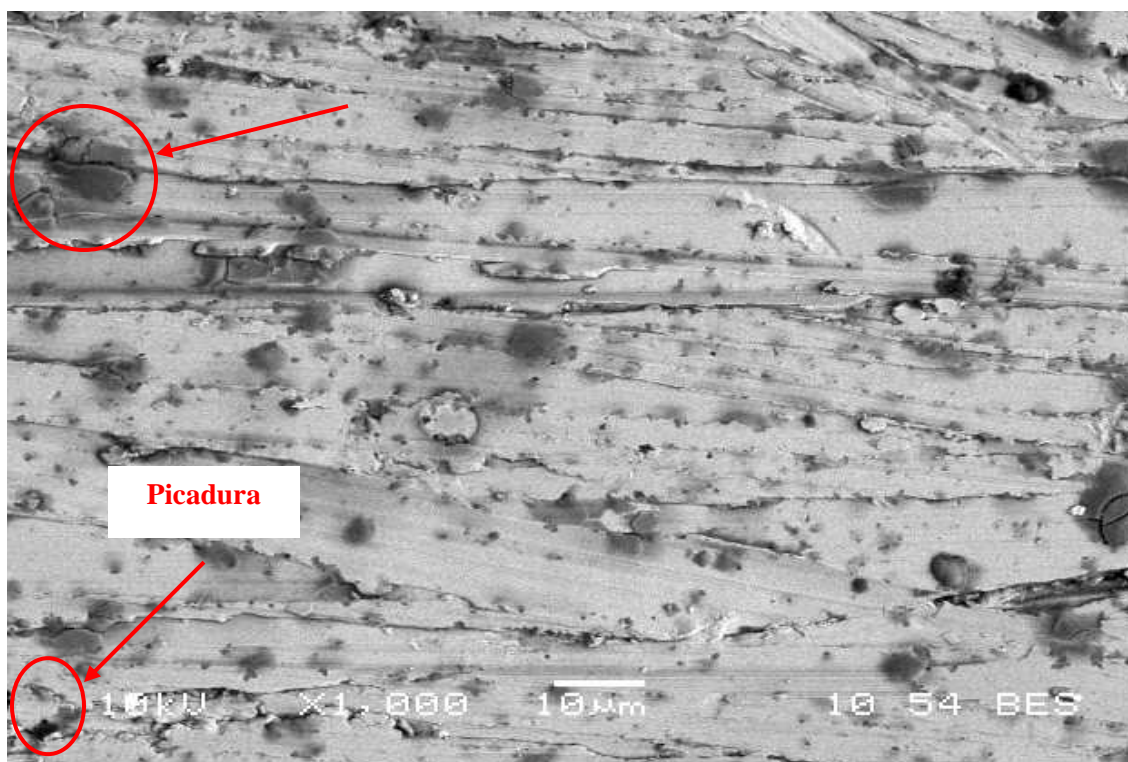


Figura 4.28. Micrografía de SEM (X500) sobre una superficie del níquel en Mexicali a los seis meses de exposición la cabina de simulación.



Figura 4.29. Micrografía de SEM (X500) sobre una superficie del níquel en Mexicali a los seis meses de exposición la empresa HONEYWELL.

La corrosión del níquel se relaciona en gran parte a la presencia del SO₂ en ambientes de exterior y penetra al interior de plantas industriales con niveles altos de humedad relativa, originando una velocidad de deposición moderada. Los principales compuestos adheridos al níquel son el carbono, óxidos y compuestos del azufre (Figuras 4.30 y 4.31).

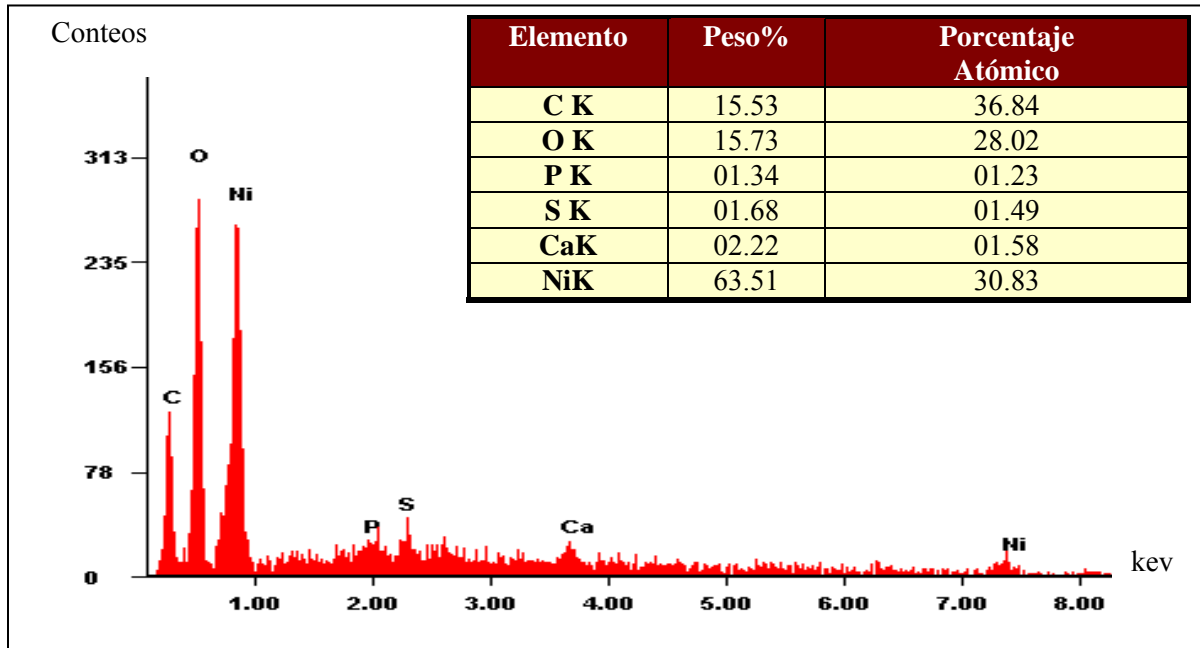


Figura 4.30. Análisis de EDS del níquel a los seis meses de exposición en la cabina de simulación.

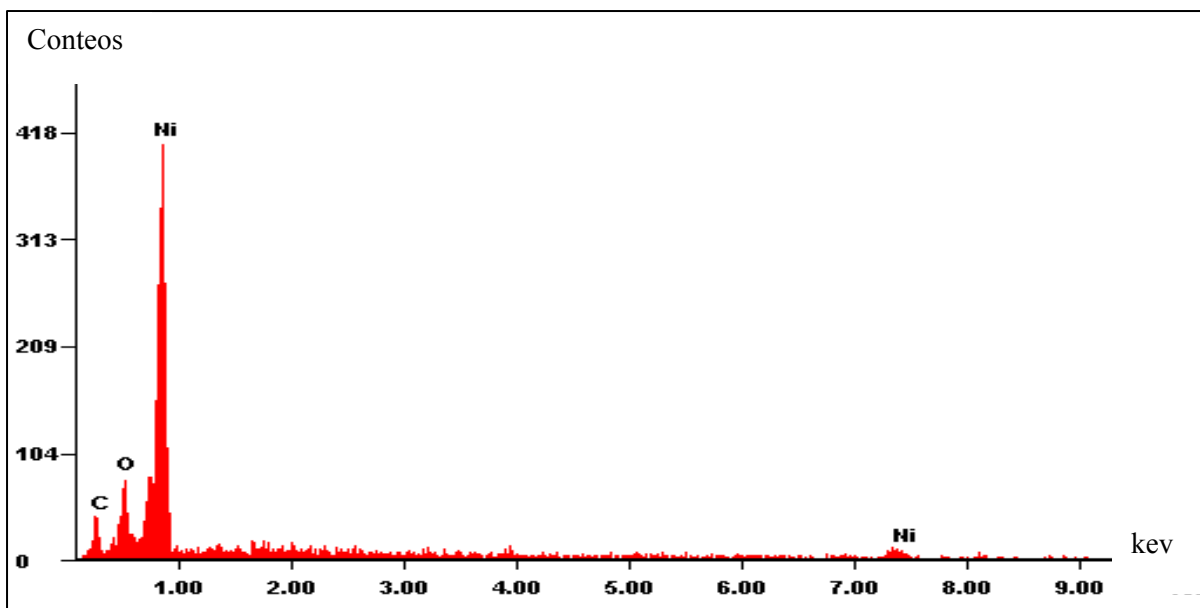


Figura 4.31. Análisis de EDS del níquel a los seis meses de exposición en el cuarto limpio de la empresa TELEPLAN.

d) Plata.

Diversos estudios de la exposición plata en condiciones de interior y exterior, muestran que el proceso de la corrosión es igual en ambos sitios de evaluación, llevando a opiniones contradictorias respecto a el aire húmedo si afecta o no al proceso corrosivo. Sin embargo, la presencia de sulfuros como el H_2S y el COS que reaccionan rápidamente con el metal en el ambiente de exposición sí resulta ser un factor en el incremento de la velocidad de corrosión. Los resultados experimentales muestran que el mecanismo de la sulfidación de la atmósfera, ocurre a través de un proceso de adsorción de los gases mencionados que forman micro y macro películas húmedas y fomentan la disociación de iones metálicos. Los cloruros que forman la sal $AgCl$, tienen un efecto mayor que los sulfuros en el deterioro de la plata. En la cinética del fenómeno corrosivo, se observan dos tipos de comportamientos: (1) lineal, cuando se forma sólo una película delgada pequeña de productos de corrosión donde se observan manchas de sulfuro de plata Ag_2S y (2) parabólico, cuando una película de $AgCl$ cubre la superficie total del metal. La ganancia de peso de la plata expuesto a ambientes corrosivos en condiciones de interior es debido a la presencia principalmente de cloruros, sulfuros y contaminantes orgánicos. Por la propiedad de brillantez, la plata es un metal el cual se puede observar a simple vista y rápidamente el efecto de la corrosión, con incrementos de peso desde $20 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{año}$. Los resultados muestran una velocidad de corrosión de $150 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{año}$ que se incrementa rápidamente a partir del segundo año de exposición (figura 4.32). La principal fuente de H_2S es la planta geotermoeléctrica de Cerro Prieto ubicada unos 10kms. de la ciudad de Mexicali . El comportamiento de la corrosión en la plata fue parabólico, formándose $AgCl$ y Ag_2S como revelan los análisis de SEM/EDS donde aparecen

manchas oscuras en la superficie metálica (Figuras 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 y 4.37).

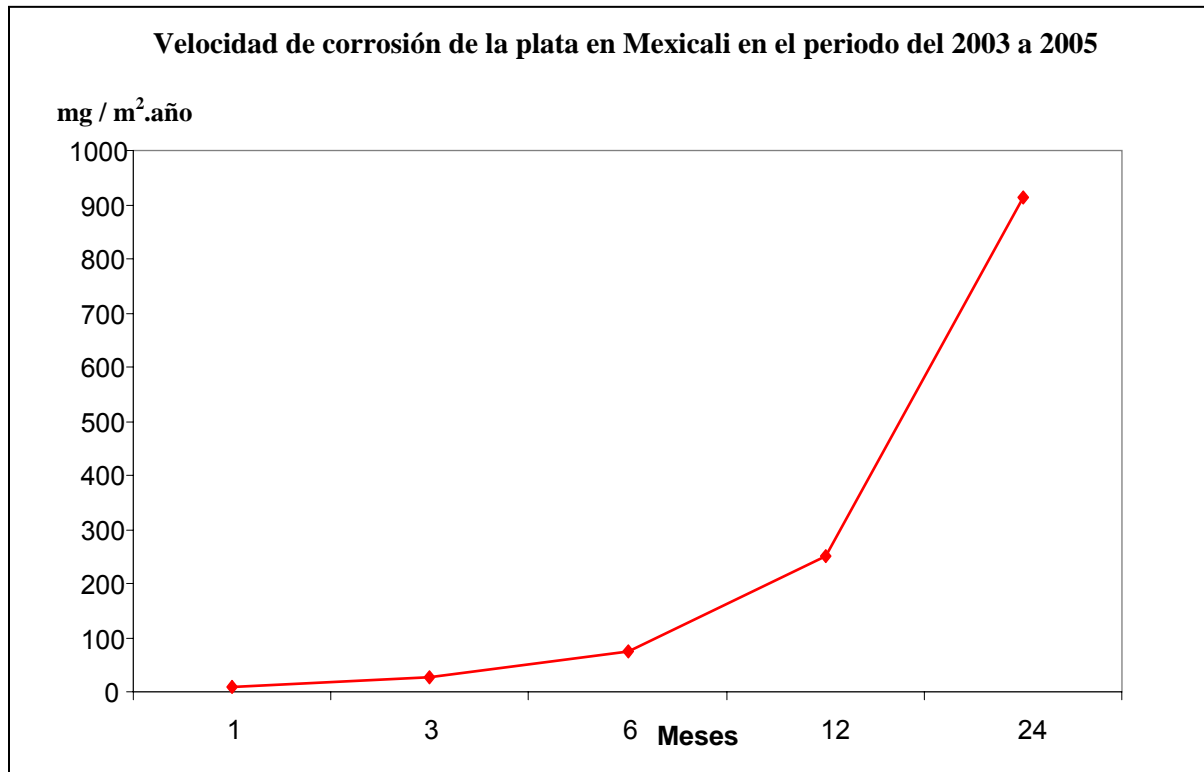


Figura 4.32. Evaluación de velocidad de corrosión de la plata en la cabina de simulación en el periodo del 2003 al 2005.

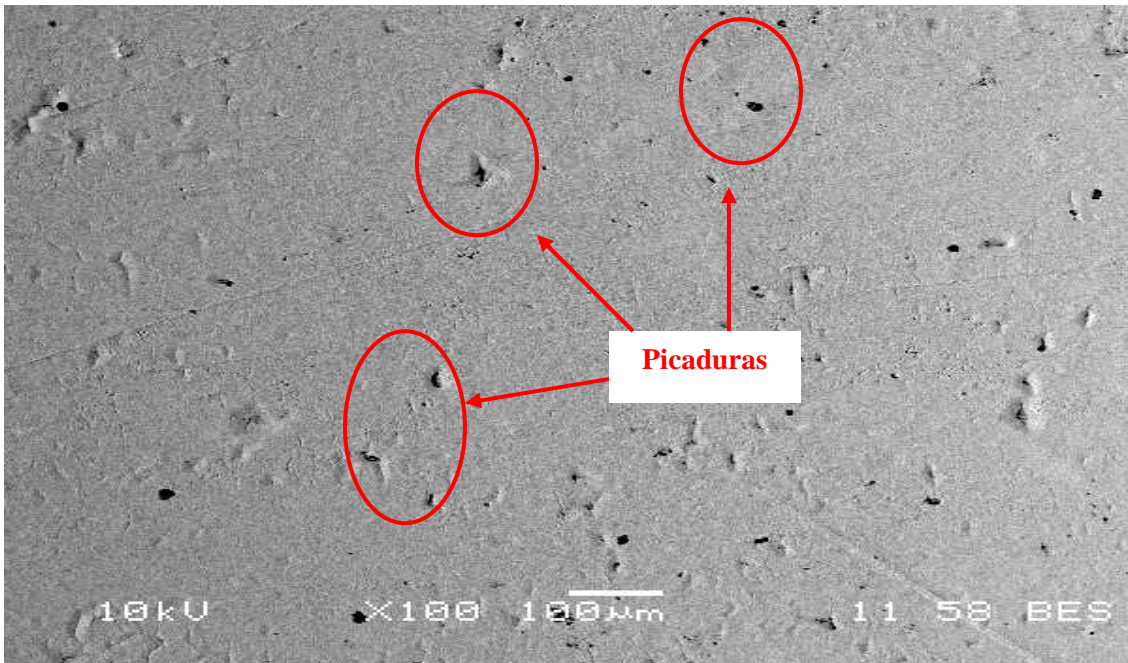


Figura 4.33. Micrografía por SEM (X100) sobre una superficie de la plata a los seis meses de exposición en la cabina de simulación.

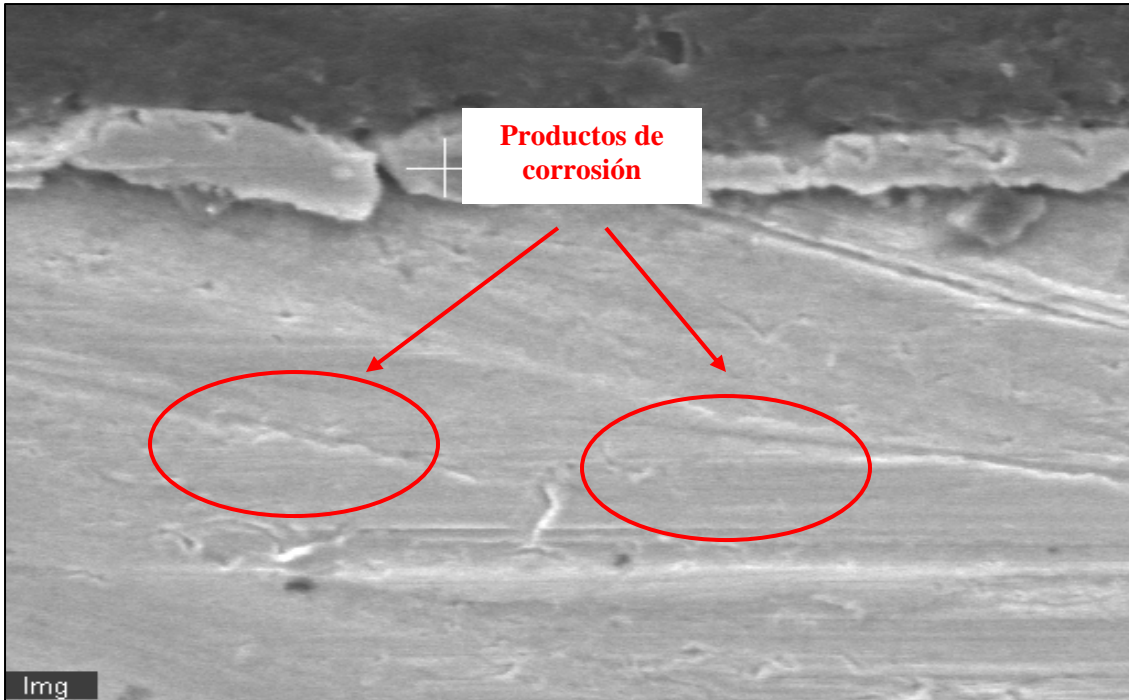


Figura 4.34. Micrografía de barbas de sulfuro de plata por SEM (X500) sobre una superficie de la plata en Mexicali a los seis meses de exposición en la empresa FURMEX.

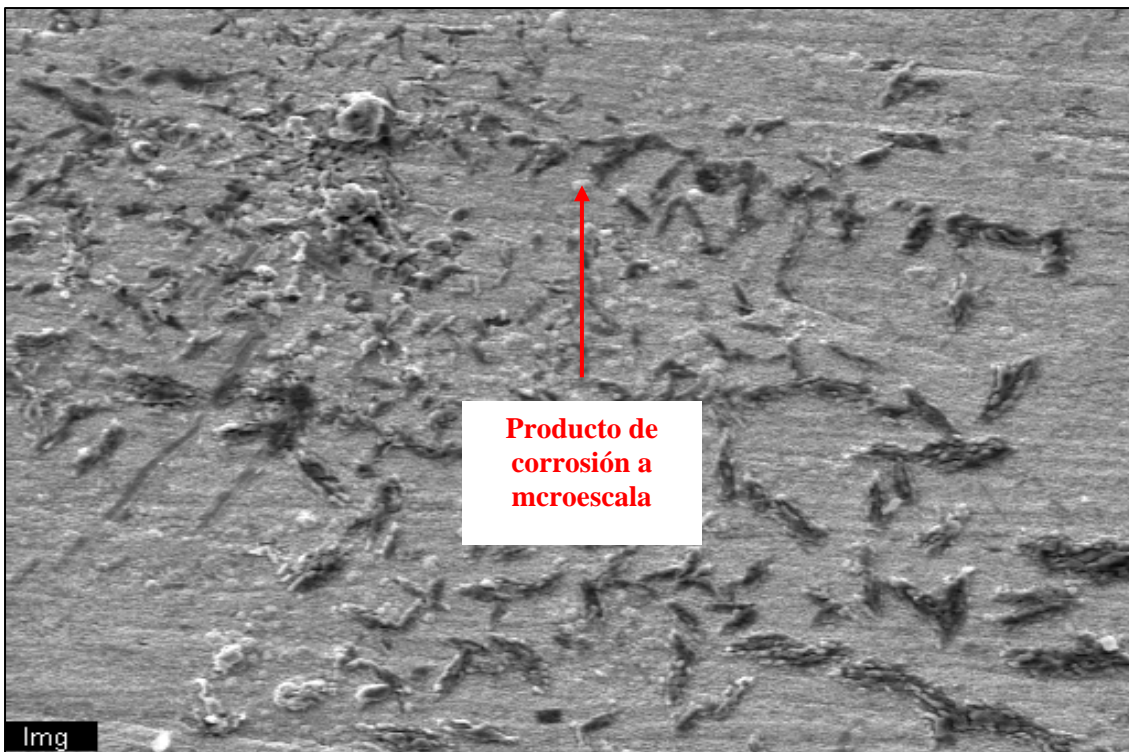


Figura 4.35 Micrografía por SEM (X5000) indicando la película de productos de corrosión sobre una superficie de la plata en Mexicali a los seis meses de exposición en la empresa FURMEX.

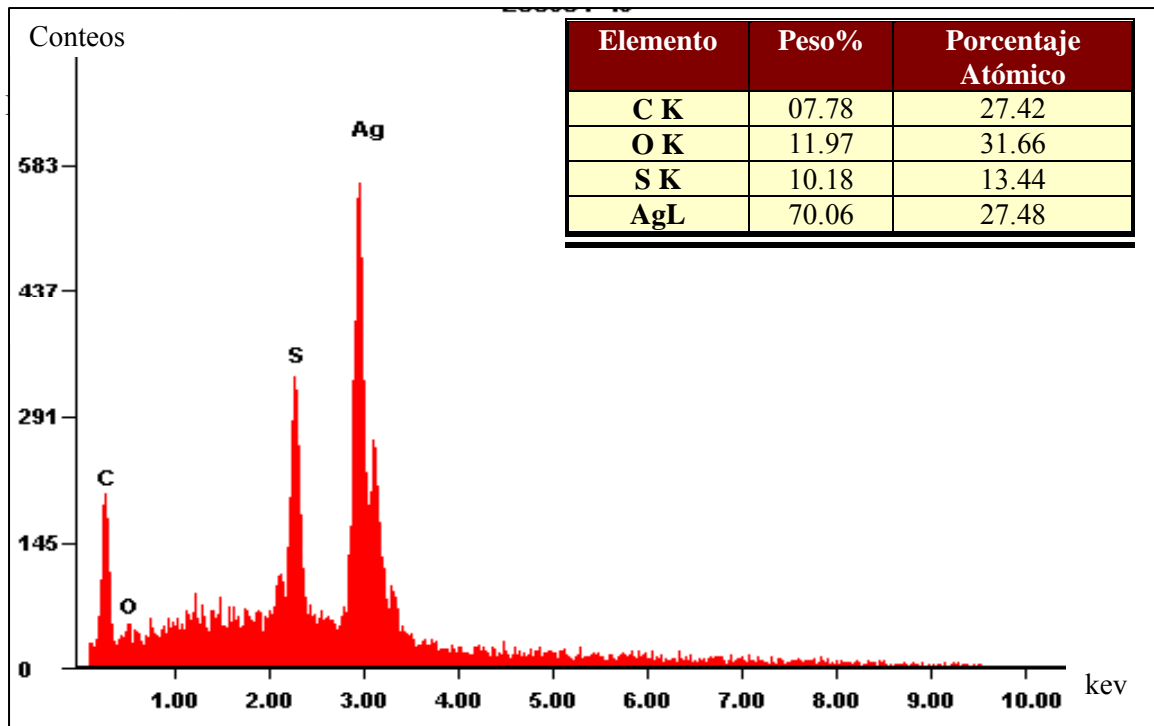


Figura 4.36. Análisis de EDS de la plata a los seis meses de exposición en la cabina de simulación.

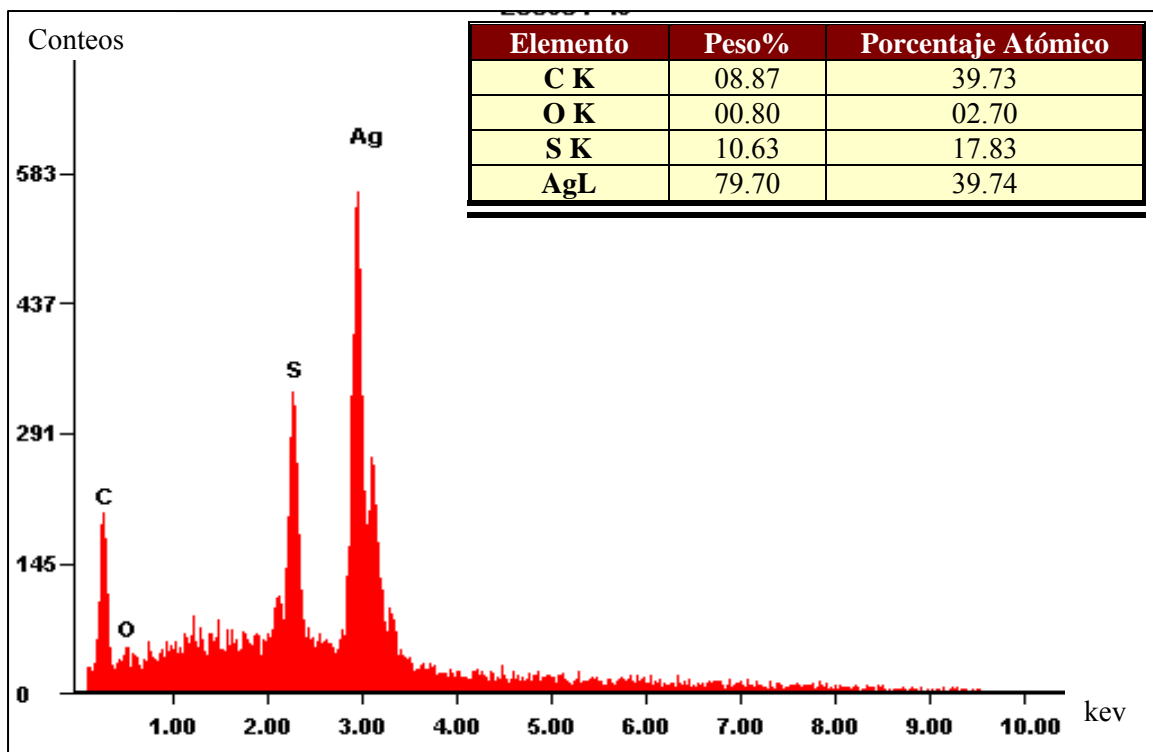


Figura 4.37. Análisis de EDS de la plata a los seis meses de exposición en la empresa HONEYWELL.

CONCLUSIONES.

Los microcircuitos, conectores y contactos eléctricos utilizados en la industria electrónica, son muy susceptibles a la corrosión atmosférica, que se da en condiciones de interior en plantas de la industria electrónica en Mexicali, B.C.

La exposición de estos componentes a ambientes no controlados en el interior de plantas industriales, ocasiona un deterioro por corrosión en los materiales de estos dispositivos electrónicos.

Las variaciones de humedad relativa en el rango de 40% a 90% y temperaturas que oscilan entre 0°C y mayor de 35°C, aunados a concentraciones de contaminantes del aire como sulfuros, que sobrepasan las normas estándares de calidad del aire, generan corrosión.

Los productos de corrosión, aun en escala de microgramos, pueden interrumpir el flujo de corriente de electrones entre los contactos eléctricos, teniendo un componente inútil y con ello una falla eléctrica.

Las partículas y gases contaminantes que se depositan en superficies metálicas de micro componentes electrónicos, provienen de procesos industriales de las diversas empresas de la localidad, zonas con altos niveles de contaminación del aire por el gran tráfico vehicular ciudadano, almacenes, oficinas y áreas donde se originan ambientes húmedos.

Los equipos electrónicos instalados en plantas industriales están expuestos a factores ambientales del interior y del exterior.

El diseño electrónico, así como la naturaleza del ambiente son importantes en el rendimiento operativo de los sistemas industriales, donde se originan fallas eléctricas en

circuitos impresos, circuitos integrados y otros componentes electrónicos y eléctricos muy susceptibles al daño por la corrosión atmosférica.

La mayoría de los dispositivos electrónicos son sellados o se protegen de manera directa de salpicaduras de líquidos, lluvia, nieve y del efecto de la condensación y están muy propensos a sufrir daño por la corrosión en diferentes entornos. Por ejemplo la sulfidación de la plata por H_2S , se origina en zonas secas y ambientes húmedos. Cuando los niveles de humedad son mayores al 70% lo que se conoce como tiempo de humectación. En Mexicali los periodos con condiciones de TH con valores máximos fueron en el mes de febrero y agosto, a de las 3 a.m. a las 10 a.m. en el mes de febrero con 163 horas/mes y de las 2 a.m. a las 6 a.m. en agosto con 135 horas/mes, donde la humedad es mayor al 70% en la mayor parte de los días de cada mes. Con niveles altos del tiempo de humectación, como los que se presentan en esta ciudad, se forma una película delgada en superficies metálicas, originando el proceso electroquímico, y conforme el valor se acerca al 100%, la película es más gruesa, por lo que la duración del tiempo en que ocurre este proceso se define como el tiempo de humectación.

La formación de la película en el metal, depende de factores como naturaleza del material, rugosidad de la superficie y composición, temperatura y contaminantes adheridos a la superficie. La naturaleza y composición compleja de la película de humedad, determinan la interacción de la interfase formada por la diversidad de variables, que generan la corrosión en la industria electrónica. Este comportamiento es significativo porque las pruebas de corrosión se diseñan para incluir los efectos de reacciones químicas complejas. En algunos casos, ciertos materiales metálicos como el

cobre y la plata, con niveles de humedad mayores al valor crítico, y concentración baja de H_2S , originan corrosión.

Cuando el H_2S monitoreado en el 2004, de donde se obtuvieron valores mínimo de 0.72 ppm el 5 de mayo y máximo de 1.3 ppm el 8 de enero y 13 de marzo en una empresa, entra en contacto con el cobre, éste se corroe de manera constante a un ritmo creciente con el aumento de la humedad, mientras que en ausencia de contaminantes, su tasa de corrosión es muy baja, incluso a valores cercanos al 100% de humedad relativa.

En los análisis de superficie con el SEM/EDX, se muestran los tipos de sulfuros de cobre formados en el las probetas de este material que es muy utilizado en la microelectrónica.

Los compuestos derivados formados a la superficie de cobre, fueron la calcocita, diurlita, digenita y geerita, los cuales fueron caracterizados utilizando los porcentajes atómicos obtenidos de los análisis de EDX. Con esto, se muestra que el cobre metálico genera productos de corrosión del tipo sulfuro de cobre, ya que el principal agente corrosivo que interactúa en este metal es el H_2S que puede desplazar las películas protectoras de óxido de cobre formadas previamente.

El daño que se origina en tableros electrónicos de sistemas industriales, debido al ataque por corrosión, es irreparable y comprometen la confiabilidad de los dispositivos electrónicos.

Las pruebas ambientales en la industria electrónica y los programas de prevención y control de la corrosión se deben desarrollar cuidadosamente para obtener el mayor beneficio en las actividades de producción de empresas.

Para evaluar y proteger los equipos electrónicos de contaminación superficial y ataque por contaminantes atmosféricos que genera corrosión, se deben utilizar pruebas

estándares ASTM o ISO, con las cuales se mostraron los niveles de corrosividad de los metales analizados en interiores de plantas industriales de Mexicali.

En esta investigación se analizaron los cinco metales mencionados anteriormente y se evaluó la velocidad de corrosión en una cabina de simulación y en cinco empresas del ramo electrónico con el estándar ISO 9223 para obtener el nivel de corrosividad en cada metal, considerando niveles de humedad relativa, temperatura y concentración de contaminantes del aire como CO, O₃, NO_x y SO₂.

El acero al carbono fue el que sufrió un mayor deterioro seguido del cobre, plata, cobre, estaño y níquel. Específicamente en este estudio se trabajó con el mecanismo de corrosión de cobre por sulfuros, como ya se describió anteriormente.

Las pruebas de corrosión en condiciones de interior de las probetas de plata indican un nivel de corrosividad IC2 que representa un grado menor de deterioro, mientras que el cobre mostró niveles de IC2 e IC3 el de mayor daño a los metales evaluados en esta investigación.

No existen estándares para el estaño y níquel. La pérdida de peso del cobre y plata fue similar, mientras que en el estaño y níquel es muy pequeña comparada con los dos metales mencionados. En la superficie de la plata se presentaron manchas no uniformes, debido a productos de corrosión de Ag₂S y AgCl, mientras que en el cobre se formó el Cu₂O.

El proceso de corrosión de la plata es definido por una forma parabólica, pero en el cobre, estaño y níquel representa un gráfico polinomial.

El estaño y níquel presentaron fracturas y corrosión por picaduras debido a la formación de óxidos en la superficie metálica después de pocos meses de iniciado el estudio, por la presencia de cloruros.

Para el análisis de la correlación de los factores climáticos y atmosféricos utilizados en la investigación con gráficos tridimensionales, se utilizó el MatLab donde se observa en ciertos rangos de humedad relativa y temperatura, y a ciertos niveles de las concentraciones de los contaminantes del aire monitoreados en esta ciudad, la velocidad de corrosión es baja y en valores críticos de los tres parámetros mencionados, ésta aumenta considerablemente. La aplicación del MatLab es una nueva metodología que puede ser utilizada para el análisis de corrosión atmosférica en zonas desérticas y semi-desérticas, como quedó demostrado en esta investigación.

Otro fenómeno observado en los análisis, fue la degradación de materiales metálicos en tableros electrónicos, que generan conductividad eléctrica en zonas no deseadas (dendritas). Estas crecen en el estaño y zinc, principalmente lo suficientemente grandes para originar corto circuitos.

La corrosión en la industria electrónica se ha convertido en un factor significativo en los últimos años, debido a la extrema complejidad que los sistemas que se fabrican y a la creciente demanda por su confiabilidad. Los avances tecnológicos han posibilitado el desarrollo de sofisticados componentes más estrecha con el espaciamiento de modo que con índices bajos de contaminantes corrosivos se produce una falla eléctrica y con la disminución del rendimiento operativo de equipos electrónicos. Las pruebas para detectar este tipo de comportamiento son difíciles y costosas.

RECOMENDACIONES.

1. Mantener climas controlados en las áreas de producción y manufactura, similar a los de los cuartos limpios, para evitar que con valores mayores del 70% de humedad y 35 °C de temperatura, se originen el tiempo de humectación.

2. Elaborar una prueba de corrosión instalando probetas de cobre en zonas con mayor exposición de los contactos metálicos de equipos electrónicos que son este material metálico, evaluando el deterioro de este metal de prueba y predecir la corrosión.

BIBLIOGRAFÍA.

- Abdulaziz A. And Maher A.; Atmospheric corrosion investigations of iron using quartz crystal microbalance; The Electrochemical Society; consultado en: <http://www.electrochem.org/dl/ma/204/pdfs/0483.PDF>; 2003.
- Adler Ralph P.I., Snoha Daniel J., Hawthorn George, and Hihara Lloyd H.; Characterization of Environmentally Exposed Aluminum Metal Matrix Composite Corrosion; TRI-Service Corrosion Conference; consultado en: <http://www.dodcorrosionexchange.org/References/Files/06T029.pdf>; 2005.
- Annual Book of ASTM Standards (G4, G15, G31); Section Three; Metals Tests Methods and Analytical Procedures; Vol. 03.01; 2001.
- Asami K. and Kikuchi M.; In-depth distribution of ruts on a plain carbon steel and weathering steels exposed to coastal-industrial atmospheres for 17 years; Corrosion Science; Vol. 45; pages 2671-2688; 2003.
- Ashrae; Handbook; Heating, Ventilating, and Air-Conditioning; applications; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.; 1999.
- Asociación de Maquiladoras de Mexicali-AMAQ; Departamento de Estadística; Reporte Anual de la Industria en Mexicali; Gobierno Municipal; 2004.
- Austin Michael D. et al, 6 nm half-pitch lines and 0.04 μm^2 static random access memory patterns by nanoimprint lithography, 2005 Nanotechnology **16** 1058-1061, consultado en: <http://www.iop.org/EJ/abstract/0957-4484/16/8/010>
- Baboian R.: Corrosion tests and standards: application and interpretation; ASTM Publications, Philadelphia, PA, 1995.
- Baeza H, Guzmán M., Ortega P. & Vera L.; Corrosion Inhibition of Cooper in 05 M Hydrochloric Acid B 1,3,4-Thiadiazole-2,5-Dithiol; Jorunal of Chilean Chemical Society; ISSN 0717-9707; 2003.
- Battelle Memorial Institute-NBS; Costs of corrosion in the United States; consultado en: <http://www.corrosionsource.com/cost/CorrosionCostUS.htm>; 2006.
- Bella H. Chudnovsky; Degradation of Power Contacts in Industrial Atmhospere: Silver Corrosion and Whiskers; Square D Company; 2002.
- Cai J.-P. and Lyon S.B.; A mechanistic study of initial atmospheric corrosion kinetics using electrical resistance sensors with ASTM standards; Corrosion Science; Vol. Vol. 47; pages 2957-2973; 2005.
- Camuffo, D. and Bernardi, A.; Controlling the Microclimate and the Particulate Matter inside the Historic Anatomic Theatre, Padova. *Museum Management and Curatorship*, 15, 285-298; 1997.
- Castejón A.; Electrónica general; Editorial Santillana; 1999.
- Cerrud-Sanchez. S.M, Armendáriz J., Ortiz-Prado V.H., Schouwenaars R.; Deterioro por corrosión atmosférica de componentes electrónicos de equipo telefónico; INGENIERIA. Investigación y Tecnología VI, 4. 219-237; 2005.
- Corvo F., Mndoza A.R., Autie M. and Betancourt N.; Role of water adsorption and salt content in atmospheric corrosion products of steels; Corrosion Science; Vol. 39; pages 815'820; 1997.
- Chongchen Xu; Corrosion in Microelectronics; Partial Filfillment of MatE 234; 2003.

- Cole S. and Paterson D. A.; Relation of atmospheric pollution and the generation of corrosion in metals of copper, steel and nickel; Corrosion Engineering; 2004.
- Cole S., Ganther W., D, Anderson G., Bailey G., Roberts D., Robinson J., Starke G. and Wallace N.; Corrosion control and prevention in metallic components of electronics industry Australasian Corrosion Association, Paper 38-062; Australia; 1998.
- Dunbar S. R. and Showak W.; Atmospheric Corrosion, Corrosion Science; 1999.
- Frankel G.S: in 'Corrosion mechanism in theory and practice', (eds. P. Marcus and J. Oudar), Marcel Dekker, Inc, , N. Y., 547- 579,1995.
- Frankenthal R.P. in '*Uhlig's Corrosion Handbook*', Second Edit., (ed. R. Winston), John Wiley & Sons, Inc., 2002, N. Y., 941-947.
- Felú S.y Morcillo M.; Analisis de corrosión atmosférica y protección de metales usados en la industria electrónica; Ed. Bellaterra, 1995.
- Flores P. Juan F.; Valdez S. Benjamin; Schorr W. Miguel; Cabina de investigación de corrosión para la industria electrónica en interiores; Ingenierías; Vol. VI, No.21; 2003.
- Fontana Mars G.; Corrosion Engineering; Editorial McGraw-Hill; 1986.
- García C. Rafael; Boletín Meteorológico Mensual; Instituto de Ingenieria; Universidad Autónoma de Baja California; Vol. 11, nos. 1-12; 2003.
- Gerhardus H. Koch, Michiel P.H. Brongers, and Neil G. Thompson (NACE); Historic Congressional Study: Corrosion Costs and Preventive Strategies in United States; Materials Performance, Corrosion Prevention and Control Worldwide; consultado en: http://www.nace.org/nace/content/publicaffairs/images_cocorr/ccsupp.pdf; 2006.
- Guttman H.and Sereda P. J; Evaluation of metal corrosion in the atmosphere; ASTM STP 435; American Society for Testing and Materials; 1998.
- Hasnik M. & Bergmann H.W.; Corrosion investigation on classical tin-lead and lead-free solder alloys; University of Bayreuth, Germany; 2000.
- Henricksen J., Hienonen R.and Imrell T.: in 'Corrosion of electronics', Bulletin No.102, 1991, Swedish Corrosion Institute, Stockholm, Sweden; 1997.
- ISO/CD 11844-1, Corrosion of metals and alloys – Classification of low corrosivity in indoor atmospheres – Part 1: Determination and estimation of indoor corrosivity, 2001.
- ISO 9223, Corrosion of Metals and Alloys. Corrosivity of Atmospheres. Classification, International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland, 1992.
- Jasner M., Hecht M. and Beckman W.; Heat exchangers and piping systems from copper alloys-Comiisioning, operating and shutdown; KME publication; 1098, 0005 0104; 1998.
- Johansson E., Leygraf C. and Rendahl B.: *Brit. Corros. J.*: 1998, 33, (1), 59-66. 1998.
- Jones D.; Principles and Prevention of Corrosion; Prentice Hall; 1996.
- Katayama H., Noda K., Masuda H., Nagasawa M., Itagaki m. and Watanabe K.; Corrosion simulation of carbon steels; in atmospheric environment; Corrosion Science; Vol. 47; pages 2599-2606; 2005.
- Kihira H., Senuma T., Tanaka M., Nishioka K., Fujii Y. and Sakata Y.; A corrosion prediction method of weathering steels; Corrosion Science; Vol. 47; pages 2377-2390; 2005.

- Leidecker H., Brusse J; Tin Whiskers: A History of Document Electrical System Failures; Technical Report to Space Shuttle Program Office, consultado en: http://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf; April 2006
- Lewis B.J., Houston P.N. & Bladwin D.F.; Flip Chip Processing for SIP Applications; consultado en: <http://www.assemblymag.com/CDA/ArticleInformation/coverstory/BNPCoverStoryItem/0,6490,118357,00.html> ; 2004.
- Leygraf C.: in 'Corrosion mechanism in theory and practice', (eds. P. Marcus and J. Oudar), Marcel Dekker, Inc, , New York, 447-455,1995.
- Leygraf C. and Graedel T.: in 'Atmospheric corrosion', Electrochemical Society Series, Wiley Interscience, , N. Y., 109-127, 192-204, 319-327,2000.
- Lyon S. B., Wong C. W. and Ajiboye P.; Analysis of atmospheric corrosion in indoor conditions; ASTM STP 1239; Philadelphia, PA, American Society for Testing and Materials; 1996.
- Morcillo, M.; Evaluación de especímenes metálicos en la zona urbana de Madrid, España; Revista Iberoamericana de Corrosión; 17 (4) 42; 1996.
- NAAQS- National Ambient Air quality Standards; U.S. Environmental Protection Agency (EPA); consultado en: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>; 2006.
- Neufeld A. K. and Cole I. S; Atmospheric corrosion of metals in indoor conditions. Case of study in Taiwan; American Society for Testing and Materials. No. 53; pages 788-799; 1997.
- Nishikata A. and Ichihara Y; The effect of Time of Wetness (TOW) in metallic components; Corrosion Science; No. 37; 1995.
- Nishimura T., Katayama H., Noda K. and Kodama T.; Effect of Co and Ni on the corrosion behaviour of low alloys steels in wet-dry environments; Corrosion Science; Vol. 42; pages 1611-1621; 2000.
- Norberg P; Durability of structural materials and components; Proc. 6th;Int. Conerence; Omiya, Japan; 1997.
- Oesh S. y M. Faller; Environmental effects on materials; Corrosion Science; 1997.
- Oh Sei J., Cook D.C. and Townsend H. E.; Atmospheric corrosion in different stells in marine, rural and industrial environments; Corrosion Science; Vol. 41; pages 1687-1702; 1999.
- Peterson P. J.; Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection; ASM Handbook, Vol 13A, 1999.
- Ponchak G.E.; Multichip Module-Dielectric Package; encontrado en: <http://parts.jpl.nasa.gov/mmhc/9-IV.PDF>; 2004.
- Protopopoff E. and Marcus P.; Potential-pH diagrams for sulfur and hydroxyl on copper surfaces in water containing sulfides, sulfites or thiosulfates; Corrosion Science, Vol. 45; pages 1191-1201; 2003.
- Rice D.W., Cappell R.J, Kinsolving W.and Laskowski J.J.: Corrosion tests;J. Electrochem. Soc., , 127, (4), 891-901,1998.
- Roberge, P..R.; Handbook of corrosion engineering; Mc GrawHill; 2000.
- Rothwell, N. and M. Tillmin. The Corrosion Monitoring Handbook. Kingham, Oxford, UK: Coxmoor Publishing, 2000.
- Ryder E.; Electrónica. Fundamentos y aplicaciones; Editorial Panamericana; 1996.

- Santana Rodríguez Juan j., Santana Hernandez F. Javier and Gonzalez Gonzalez Juan E.; The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, copper, zinc and aluminum in a limited geographic zone with different types of environment; *Corrosion Science*; Vol. 45; pages 799-815; 2003.
- Sereda P.J.; Relation of atmospheric corrosion of metals with time of wetness in indoor conditions; American Society to Testing and Materials; 1995.
- Sereda P.J.; Weather factors affecting the corrosion of metals; American Society for Testing and Materials; 1996.
- Smailos, E.; Schild, D.; Gompper, K.; Gamma irradiation-corrosion studies and surface analytical investigations of the HLW container material Ti99.8-Pd.; consultado en: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=/fzk/5869&search=/fzk/5869>; Feb, 1997.
- Stanley S. Wong, Ngai T. Lau, Chak K. Chan, Ming Fanng, Lap-In Chan; Effect of atmospheric particles on corrosion; consultado en: <http://www.ust.hk/~3aachk/Index/Wed-G07.pdf>; 2006.
- Stupnisek-Lisac E. & Cinotti V.; Atmospheric corrosion inhibitors for cooper in the electronics industry; Faculty of Chemical Engineering and Technology, University of Zagreb, Croatia; 1999.
- Tahara A. and Shinohara T.; Influence of the alloy element on corrosion morphology of the low alloy stell exposed to the atmospheric environments; *Corrosion Science*, Vol. 47; pages 2589-2598; 2005.
- Valdéz B., Rosas N., Carrillo M, Sanpedro J., Velera L. M., II NACE Mexican Section Corrosion Congress, Simposium 4. Corrosión de Plata en la Industria Electrónica. México, 2002.
- Valdez B.y Schorr M.; El control de la corrosión en la industria electrónica; *Revista de Ciencia y Desarrollo*; 2006.
- Velasco, L.; La contaminación atmosférica de las grandes urbes; *Ciencia y Desarrollo*; 65; marzo-abril; 1996.
- Virmani Y. P.; Corrosion Costs and Preventive Strategies in the U.S.; Publication No. FHWA-RD-01-156; HRDI, (202) 493-3052; consultado en: <http://www.corrosioncost.com/pdf/techbreif.pdf> ; 2006.
- Veleva L., Pérez G. and Acosta M.: *Atmos. Environ.*: 1997, **31**, (5), 773-776.
- Veleva L.and Maldonado L.: *Brit. Corros. J.*: 1998, **33**, (1), 53-57.
- Virmani Y. P.; Corrosion Costs and Preventive Strategies in the U.S.; Publication No. FHWA-RD-01-156; HRDI, (202) 493-3052; consultado en: <http://www.corrosioncost.com/pdf/techbreif.pdf> ; 2006.
- White E., Slenski G and. Dobbs B: in ‘ASM Metals Handbook, Volume 13, Corrosion’, ASM International Handbook Committee, 1987, ASM International, 1113-1126; 1996.
- Youping Liu; Modeling the time-to-corrosion cracking of the cover concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures; consultado en: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-44541620119653540/Liu.pdf>; 1996.

Glosario.

Absorción. Es un proceso en donde un componente soluble de tipo gaseoso o en forma de vapor, que puede estar en contacto y distribuirse en un líquido. La absorción selectiva se utiliza para separar elementos de una muestra de gases o vapores.

Acidez. Es el grado de aceptación de los protones en un disolvente.

Ácido. Es una sustancia que tiende a perder un protón, requiriendo de un disolvente aceptor de los protones.

Acople galvánico. Es un par de conductores diferentes que forman una unión metálica, con características específicas de potencial de cada metal.

Actividad aeróbica. Ocurre en ambientes interiores donde existe oxígeno y flujo de aire.

Actividad anaeróbica. Se da en ambientes interiores por falta de oxígeno o flujo de aire.

Actividad de electrolitos. Es el proceso en el cual un electrolito tiene una concentración específica para que ocurra el fenómeno de corrosión.

Actividad de iones. Es difícil medirla directamente en un proceso experimental, por lo que se usa la actividad media del electrolito.

Adsorción. Es la atracción de átomos extraños a una interfase entre un líquido y un sólido, donde ocurre un decremento de tensión superficial en el líquido y absorción en el sólido.

Afinidad química. Es la tendencia de que ocurra la combinación química de dos sustancias y el proceso de descomposición de un componente sobre otro.

Agente reductor. Es un elemento que causa la reducción, que se forma cuando disminuye la cantidad de oxígeno en un compuesto que contiene hidrógeno.

Agente oxidante. Es un elemento que causa la oxidación, formado cuando se incrementa el oxígeno en un compuesto que contiene hidrógeno.

Aireación. Es la acción de exposición de metal a un flujo de viento en un ambiente interior o exterior.

Aireación diferencial. Es la acción de contener diferentes magnitudes y direcciones del flujo de viento.

Aislamiento eléctrico. Es la condición de separar eléctricamente dos conductores metálicos.

Ambiente industrial. Es una atmósfera interior en plantas industriales donde se manufacturan artículos industriales, fabricados y evaluados por dispositivos y equipos electrónicos.

Amperímetro. Es un instrumento que mide la magnitud del flujo de corriente eléctrica.

Anión. Es un átomo o grupo de átomos con carga negativa, existiendo sólo en forma libre en una disolución

Ánodo. Es un electrodo con carga positiva atrayendo a iones con carga negativa, por ejemplo el cloro liberado en un proceso de electrólisis.

Base. Es una sustancia química que reacciona en disolución acuosa con un ácido para formar una sal, quedando el agua separada y suministrando iones oxhidrilo.

Catión. Es un ión cargado positivamente que se transporta hacia el cátodo en un proceso de electrólisis.

Celda activa-pasiva. Es una celda activa en una superficie metálica el cual el ánodo tiene un estado activo y el cátodo un estado pasivo.

Celda de aireación diferencial. Es también llamada celda de concentración de oxígeno o celda de concentración, originada por una diferencia de concentración de oxígeno a través de una superficie metálica en un electrolito.

Celda de concentración. Es una celda electrolítica con una fuerza electromotriz que se forma por una diferencia en la concentración de algunos componentes en el electrolito, generándose las regiones catódicas y anódicas.

Celda de corrosión local. Es una celda electroquímica formada en una aleación metálica por una diferencia de potencial en las uniones de la aleación.

Celda electrolítica. Es un montaje que contiene electrodos y un electrolito, en el que la electrólisis puede llevarse a cabo.

Celda electroquímica. Consiste de un ánodo y un cátodo en un metal que esta en contacto o inmerso en un electrolito.

Celda galvánica. Es una celda formada por dos conductores distintos en contacto entre sí y con un electrolito.

Circuito externo. Constituido por cables, conectores, dispositivos de medición, fuentes de corriente o voltaje, utilizados para suministrar o medir las condiciones eléctricas en una celda de prueba.

Concentración de iones metálicos. Es una celda galvánica generada por una diferencia de concentración de iones metálicos en dos lugares en la misma superficie de metal.

Conductividad eléctrica. Es la propiedad de permitir el paso de corriente eléctrica por un dispositivo electrónico. También se le llama conductancia eléctrica.

Corriente impresa. Es una corriente suministrada por un dispositivo con una fuente de voltaje externa a un electrodo, siendo aplicada en la protección catódica.

Corrosión anódica. Es la disolución de un metal que actúa como ánodo.

Corrosión catódica. Es causada por la reacción de un anfotérico metal alcalino con los productos de la electrólisis.

Corrosión electroquímica. Es la corrosión que se acompaña de un flujo de electrones entre zonas anódica y catódica en superficies metálicas.

Corrosión por alta temperatura. Corrosión acelerada en una superficie metálica generada por efecto de la oxidación y reacciones químicas por sulfuros y cloruros principalmente, formando una sal derretida en una superficie metálica que rompe la capa de óxido aplicada anteriormente.

Corrosión por la atmósfera. Generada en metales por contaminantes del aire y parámetros climáticos como temperatura y flujo de viento, en ambientes exteriores e interiores.

Corrosión por sólidos húmedos. Originada por agentes atmosféricos como gases y partículas finas que se adhieren a sólidos metálicos y variaciones de humedad y temperatura.

Corrosividad. Es el grado de agresividad del fenómeno de corrosión principalmente en ambientes interiores.

Densidad de corriente. Es la corriente que fluye hacia o desde un área de una superficie metálica.

Deposito de corrosión. Es una corrosión localizada bajo o alrededor de un depósito de material en una superficie metálica.

Disolvente. Es un líquido que disuelve un componente en otro (soluto), dependiendo cual sea el de mayor o menor concentración.

Electrodo. Es un conductor electrónico usado para establecer el contacto eléctrico con un electrolítico o conductor iónico.

Electrolito. Es una sustancia química o mezcla, generalmente líquido, que contiene iones que migran en un campo eléctrico y se origina una corriente eléctrica.

Ensayo de corrosión acelerada. Método usado para evaluar en un periodo de tiempo determinado, el proceso de la corrosión en metales bajo condiciones específicas.

Elemento pasivador. Es un tipo de inhibidor que modifica sensiblemente el potencial de un metal.

Envejecimiento del metal. Es un cambio en las propiedades de ciertos metales y aleaciones que se produce en condiciones de ambiente o moderadamente elevadas temperaturas de trabajo en caliente después de un tratamiento térmico.

Estado activo. Es en el cual un metal tiende a corroerse.

Estrés. Es la intensidad de fuerzas interna distribuidas uniformemente, y que modifican la estructura de los metales.

Fractura frágil. Se produce por la rápida propagación del rompimiento en un metal.

Factor de picadura. Es la velocidad en que se genera una cavidad, dividida por la penetración promedio de la cavidad y calculada por la pérdida de peso.

Fragilización. Es la mínima pérdida de ductibilidad, flexibilidad o ambas de un metal o aleación metálica.

Falla eléctrica. Aplicada a dispositivos electrónicos inoperables y pocos confiables.

Flujo de electrones. Es un movimiento de electrones en un circuito externo que conecta un ánodo y cátodo en una celda de corrosión.

Humedad crítica. Es la humedad relativa con la cual la corrosión atmosférica de un lugar tiene un mayor grado de agresividad en metales, que en condiciones ideales.

Humedad relativa. Es la relación, expresada en porcentaje, de la cantidad de vapor de agua presente en un determinado volumen de aire a una temperatura dada, requiriendo de una cantidad necesaria para saturar el aire a esa temperatura.

Inhibidor. Es una sustancia química o combinación de sustancias que, cuando están presentes en el medio ambiente, evita o reduce la corrosión sin reacción significativa con los componentes del medio ambiente.

Inhibidor anódico. Es una sustancia química o combinación de sustancias que puede prevenir o reducir la tasa de la oxidación anódica o por una reacción física, físico-químicas o acción química.

Inhibidor catódico. Es una sustancia química que evita o reduce el proceso de reacción química en el cátodo.

Inmunidad. Es la resistencia a la corrosión de un metal originado por una estabilidad termodinámica del metal.

Iones. Son átomos o grupo de átomos, que han ganado o perdido a uno o más electrones exteriores y tiene una carga eléctrica. Existen Iones positivos, o cationes, con deficiencia de electrones en su orbita exterior y los Iones negativos, o aniones, con exceso de electrones en su orbita exterior.

Leyes de Faraday. Establecidas en 1834 por Michael Faraday, que consisten en: (1) La cantidad de electrolito descompuesto es proporcional a la corriente eléctrica que pasa a través del electrolito y (2) la cantidad de electricidad es diferente en disoluciones heterogéneas y la cantidad de electrolito descompuesto es proporcional al peso equivalente del elemento o radical liberado.

Metal activo. Es un metal con baja resistencia a la corrosión que al exponerse a ambientes corrosivos, tiende a corroerse.

Metal noble. Es un metal con alta resistencia a la corrosión, que no sufre un gran daño al exponerse a ambientes corrosivos.

Microelectrónica. Analiza micro-componentes electrónicos que realizan funciones en equipos electrónicos industriales, para las operaciones requeridas en su funcionamiento.

Oxidación. Es una reacción química en la cual un elemento aumenta su número de cargas eléctricas positivas o disminuye las cargas negativas.

Óxido. Es un compuesto formado sobre metales, compuesto por oxígeno y otro elemento.

Pasivación. Es el proceso en una corrosión metálica en el cual los metales empiezan a ser pasivos.

Pasivadora. Sustancia inhibidora que tiende a modificar el potencial de un metal para que sea noble.

Pasividad. Es una reducción de la velocidad de corrosión en un metal, siendo lo contrario al proceso de activación.

Pasivo. Es una característica de una superficie metálica que presenta baja velocidad de corrosión en una región con gran potencial que origina la oxidación en el metal.

Película anódica. Se forma con capas gruesas de óxidos en un metal para protegerlo de ambientes corrosivos.

pH. Es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución.

Picadura. Es una pequeña área de una superficie metálica corroída que toma la forma de una cavidad.

Polarización anódica. Es la intensidad del potencial anódico resultante de los efectos de corriente cerca de la superficie del ánodo.

Polarización catódica. Es un potencial generado en la superficie del cátodo.

Potencial crítico. Es el mínimo potencial requerido para que se inicie una picadura y se propague.

Potencial REDOX. Es el potencial de una oxidación-reducción con respecto a una zona del metal, indicada como área de referencia.

Producto de corrosión. Es una sustancia formada como resultado de la corrosión.

Protección anódica. Es una técnica para reducir la corrosión aplicando películas que forman óxidos para proteger a un metal.

Protección catódica. Se presenta cuando se le imprime una corriente externa directa y esa corriente convierte al metal como un cátodo o cuando se aplican trozos de metal a una superficie metálica para protegerlo como por ejemplo la aplicación del zinc sobre el acero para protegerlo.

Prueba de humedad. Es un análisis de la exposición de especímenes metálicos con respecto a niveles diferentes de humedad y temperatura.

Reacción anódica. Es un proceso de oxidación, donde se origina una transferencia de carga positiva en metales con conductores iónicos.

Reacción catódica. Es un proceso de reducción que indica la transferencia de carga negativa en metales con conductores iónicos.

Recubrimiento por conversión química. Es un recubrimiento no-metálico producido en una superficie metálica por la reacción química del metal con un ambiente determinado. Una vez aplicado este recubrimiento, se utiliza uno de tipo orgánico.

Reducción. Es una reacción en la cual un elemento disminuye sus cargas eléctricas positivas o incrementa las cargas negativas.

Resistencia a la corrosión. Es la oposición que un metal tiene de no deteriorarse rápidamente al exponerse a ambientes corrosivos.

Resistividad eléctrica. Es la resistencia eléctrica que ofrece un material al flujo de corriente.

Rompimiento de potencial. Es el potencial mínimo requerido para el inicio de la corrosión por picaduras, hendiduras o ambas.

Serie de fuerza electromotriz. Es una serie de elementos organizados de acuerdo a potenciales de electrodo estándares, con metales nobles como el oro que es muy positivo y metales activos como el zinc que es muy negativo.

Serie galvánica. Es una lista de metales y aleaciones metálicas de acuerdo al potencial de corrosión en un ambiente determinado.

Sobrecalentamiento. Es un calentamiento de un metal o aleación metálica a temperaturas mayores a las permitidas, haciendo que varíen sus propiedades y afecte su funcionalidad.

Sobretensión. Es un voltaje mayor al requerido en dispositivos electrónicos que se presenta por una falla eléctrica.

Solución acuosa. Es una solución que contiene agua y se usa como disolvente.

Solución. Es una dispersión homogénea de dos o más especies iónicas, compuesta por combinación de líquidos, sólidos, o gases; y que consta de una sola fase.

Soluto. Es el componente de cualquiera un líquido o solución sólida que está presente en menor medida.

Sulfidación. Es una reacción de un metal o aleación con un azufre que contienen especies para producir un compuesto de azufre que se forma sobre o bajo la superficie del metal o aleación.

Temperatura. Es una medida del promedio de energía cinética asociado con el movimiento de átomos y moléculas. El flujo de calor va de una región de alta a una baja temperatura.

Velocidad de corrosión. Es la cantidad de corrosión que ocurre en un periodo de tiempo. También se le conoce como la cantidad de intercambio de masa o penetración en una superficie metálica, en un tiempo determinado.

ANEXO “A”

A Materiales metálicos usados en la industria electrónica.

Existen diversos materiales utilizados en las industrias del ramo electrónico. Para un ingeniero de corrosión las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales, son importantes en la realización del análisis de la corrosión.

A1 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas representan el comportamiento de los materiales a una carga y estrés determinados, siendo indicadas por las pruebas de ingeniería que se aplican en condiciones deseadas. Las principales propiedades son: dureza, ductibilidad, fatiga, fragilidad, tensión, elasticidad y rigidez, que determinan el diseño del producto. Para seleccionar un material requerido en aplicaciones principalmente en la industria electrónica, los ingenieros de corrosión consideran la resistencia a la corrosión y tensión que puede soportar, para determinar la velocidad de corrosión. Otros factores de importancia en la funcionalidad de un material incluyen: fluidez, formabilidad, características acústicas, eléctricas, ópticas, magnéticas y térmicas, además del costo del material y el proceso de transformación.

A2 Principales materiales y aleaciones utilizados en la industria electrónica.

Los metales y aleaciones más importantes de la industria electrónica son:

- 1. Acero.** Es el más usado en diversas actividades por su dureza, ductibilidad, maleabilidad y fácil de manufacturar.
- 2. Aluminio.** Es un metal reactivo en cuya superficie se forman películas de óxidos que lo protegen de la corrosión, con un comportamiento apropiado en soluciones ligeramente

ácidas, y atacado por soluciones alcalinas. El aluminio puro es débil, pero aleado con otros materiales a altas temperaturas tiene buenas propiedades mecánicas.

3. Cadmio. Es usado principalmente en procesos de electro depósito, por su apariencia brillante y fácil de soldar en los tableros electrónicos.

4. Cobre. Al alearse con otros metales tiene alta facilidad para manufacturarse y excelente conductividad eléctrica y térmica, pero no es apropiado para usos de alta temperatura. Presenta una buena resistencia a la corrosión, pero es susceptible al ataque por sulfuros en condiciones de humedad relativa superior al 30%.

5. Estaño. Se utiliza como recubrimiento sobre otros materiales metálicos, es resistente a la corrosión y es ampliamente aplicado en las formulaciones de aleaciones de soldadura o como carga en algunos recubrimientos de tipo orgánico..

6. Magnesio. Es un material comercial ligero, pero aleado con otros metales tiene alta dureza, siendo muy utilizado en la industria automotriz, aeronáutica y naval, además para actividades militares en la fabricación de misiles. Tiene baja resistencia a la corrosión y se usa como ánodos de sacrificio en sistemas de protección catódica.

7. Níquel. Un gran número de materiales se desarrollan con este metal por su gran resistencia a la corrosión, siendo estable en soluciones alcalinas. Se utiliza en la fabricación de aleaciones de alta resistencia a la corrosión. Los productos fabricados con este metal pueden ser sometidos a altas temperaturas.

8. Plata. Es un material muy utilizado en la industria electrónica por su gran conductividad eléctrica, solo que es muy propenso a corroerse en ambientes de condiciones de interior y exterior contaminados con cloruros o ácido sulfhídrico.

9. Plomo. Fue de los primeros metales utilizado en las plantas industriales en sistemas de tuberías y tanques. Forma una película resistente a la corrosión con productos de fosfatos, óxidos y sulfatos. Es suave y fácil de manufacturar y de soldar a bajas temperaturas, es susceptible a la corrosión erosión.

10. Titanio. Es un metal utilizado recientemente por su alta resistencia a la corrosión, teniendo buena dureza al alearse con el acero, aluminio y otros metales. Se utiliza en la industria automotriz, aeronáutica y naval. Es un metal reactivo en el cual se forma una película de óxido que lo protege de la corrosión.

11. Zinc. Es un material que se corroe fácilmente, pero se usa como ánodo de sacrificio en la protección catódica del acero. Se usa en actividades de galvanizado para estructuras de soporte de dispositivos electrónicos, tuberías y tanques y puede soldarse a bajas temperaturas.

A3 Metales activos.

Son metales que reaccionan y sufren un rápido deterioro al exponerlos a ambientes compuestos por ácidos principalmente en interiores de la industria electrónica. Estos metales tienen un electrón en su banda de valencia, y esperan a que sea adquirido por otro elemento o compuesto. También se les llama metales alcalinos y son buenos conductores eléctricos y térmicos. La rapidez de reacción indica la velocidad de corrosión de los metales y eso es en base a un potencial que los determina como metales activos.

A4 Metales nobles.

Se caracterizan por una alta resistencia a la corrosión, óxidos inestables y alto costo, por lo que se les llama *metales preciosos*. En ocasiones, no se requiere de la formación de

películas protectoras (pasividad). Los metales nobles más utilizados son el oro, plata, platino, iridio, osmio, paladio, rodio y rutenio. El oro, plata y platino son comerciales y se usan con gran frecuencia en plantas industriales. Otro metal noble de importancia es el paladio que es menos comercial e industrial. Una termocupla de alambre utilizada en equipos electro-electrónicos para monitorear la temperatura, es fabricada por la aleación de platino y rodio. Otro tipo de aplicación de los metales nobles es en joyería y procesos industriales para prevenir la corrosión.

ANEXO “B”

B Estándares ASTM.

Este tipo de estándares se utiliza en las áreas de ingeniería y algunas disciplinas relacionadas a ésta. El objetivo principal de las normas ASTM y en conjunto con las de ISO, es analizar la aplicación de materiales metálicos en plantas industriales, áreas de la construcción, refinerías de petróleo y de otro tipo de materiales como aisladores de cerámica y plásticos eléctricos y electrónicos, hules, pinturas y textiles. Estos estándares se empezaron a publicar en la década de los 60's del siglo anterior, siendo que de 1967 a 1995, están en libros de texto y una versión en disco compacto incluye desde 1980 al 2004.

B1 Estándares de la corrosión atmosférica.

Para el análisis de la corrosión atmosférica se requieren de algunos estándares ASTM que se explican a continuación:

- 1. G1-90.** Aplicado para preparar las probetas de los metales que se desean estudiar y los sitios de instalación a evaluar. El método incluye el pulido, limpieza y evaluación de los especímenes metálicos de prueba.
- 2. G4-95.** Es una guía usada para realizar pruebas de experimentación en plantas industriales o áreas de campo a evaluar. El proceso incluye identificar a las probetas metálicas y los sitios de instalación, además del tiempo de exposición que puede variar de acuerdo al objetivo y los metales que se analizan, siendo desde 1 mes hasta algunos años.
- 3. G15-99b.** Se refiere a la terminología relacionada a los conceptos y pruebas experimentales de corrosión.

- 4. G16-95 (1999).** Se aplica para determinar el análisis estadístico del análisis de datos de la generación de corrosión.
- 5. G31 -72 (1999).** Se utiliza para realizar pruebas experimentales en laboratorios de corrosión y materiales o áreas afines, con el fin de conocer el efecto de los agentes corrosivos en los metales en periodos de exposición cortos, en minutos horas o días.
- 6. G50-76 (1997).** Es una guía para conocer las condiciones de exposición de los especímenes metálicos y los factores climáticos principalmente humedad y temperatura que afectan la generación de corrosión. En este estándar se evalúa la corrosión por picaduras en los metales que influyen en el origen de fallas de equipos electro-electrónicos.
- 7. G84-89 (1999).** Se aplica para evaluar la relación del tiempo de humectación (Time of Wetness-TOW-, por sus siglas en inglés), en superficies metálicas expuestas en condiciones húmedas y la corrosión atmosférica en plantas industriales.
- 8. G91-97.** Es un método utilizado para monitorear concentraciones de bióxido de azufre (SO₂) usando la técnica de platos de sulfatación.
- 9. G92-86 (1997).** Es aplicado para caracterizar el ambiente atmosférico en el interior de plantas industriales con la exposición de las probetas metálicas que se desean evaluar para conocer las partículas que se encuentran en el ambiente evaluado.
- 10. G96-90 (1996).** Se aplica para monitorear la corrosión en equipos electro-electrónicos de plantas industriales instalados en las líneas de producción, sin la necesidad de desconectarlos y detener su operación.

11. G104. Es utilizado para evaluar la corrosión galvánica que se genera en equipos electro-electrónicos por el uso de metales diferentes en las conexiones y uniones eléctricas.

ANEXO “C”

C Contaminantes del aire: polución y corrosión.

La mayoría de los problemas de corrosión son generados por la exposición de los materiales a ácidos minerales o inorgánicos, ácidos orgánicos, óxidos de azufre, nitrógeno, ozono, etc. Algunos de los principales contaminantes que promueven la corrosión en materiales metálicos usados en la industria electrónica son:

1. Ácido fosfórico. La corrosión por este ácido depende de los procesos de manufactura, aireación del oxígeno y las impurezas presentes en el acabado final de un metal. El cobre y sus aleaciones no deben ser usadas en ambientes con este ácido.

2. Ácido fluorhídrico. Tiene un efecto en ciertos metales como hierro fundido y vidrios principalmente. Este ácido y el fluoruro son tóxicos y se debe tener mucho cuidado en su uso.

3. Ácido nítrico. Es un líquido incoloro, sirve para formar películas pasivas en aleaciones de acero inoxidable, pero es corrosivo para la mayoría de los metales, y en combinación con otros ácidos forma soluciones con un alto poder de disolución de metales y aleaciones.

4. Ácidos orgánicos. El ácido acético es uno de éstos, que su efecto depende del nivel de concentración que se adhiere a los metales y variaciones de humedad y temperatura. Los metales más comunes que son atacados por este ácido son el acero, aluminio y cobre principalmente.

5. Ácido sulfhídrico. Es un ácido inorgánico en forma de gas incoloro y de un olor desagradable, similar a huevos podridos, y muy tóxico. Origina un efecto nocivo muy rápido en la salud de los seres vivos y en el deterioro de materiales, principalmente los

que son activos. Se genera de principalmente de centrales generadoras de electricidad y petroquímicas.

6. Ácido sulfúrico. Es el más producido en todo el mundo, siendo usado directa e indirectamente en plantas industriales

7. Bióxido de azufre. Se forma por la reacción de un anhídrido sulfuroso con oxígeno, siendo uno de los principales contaminantes que se monitorea y tiene un efecto dañino en los materiales.

8. Bióxido de nitrógeno. Es otro contaminante del cual se pueden conocer sus niveles con monitores especializados, proveniente de la reacción del óxido nítrico y el oxígeno a una temperatura normal.

9. Halógenos. Generan corrosión por el efecto de las variaciones de humedad, temperatura y niveles de concentración de ciertos minerales de tipo alqueno y alquino.

10. Monóxido de carbono. Genera muy dañino en la salud de los seres vivos y en conjunto con otros contaminantes origina deterioro en los materiales metálicos.

11. Ozono. Es un gas de color azul de olor picante, que se encuentra diluido con mezclas de aire o el oxígeno. Se forma por la acción fotoquímica en la estratosfera y al nivel del suelo solo existe diluido.

12. Soluciones alcalinas. Soluciones acuosas de amoníaco (NH_4OH), sosa cáustica (NaOH) y potasio cáustico (KOH) atacan severamente causando corrosión al aluminio y sus aleaciones principalmente, aunque también pueden atacar a otros metales en ciertas condiciones de operación.

ANEXO “D”

D Métodos de protección contra la corrosión.

Para la prevención y control de la generación de corrosión, se aplican algunos métodos como lo es el uso de inhibidores, diseño estructural, protección anódica y catódica y recubrimientos.

D1 Uso de inhibidores.

La utilización de inhibidores para la reducción y control de la corrosión en el interior de plantas industriales es un método muy eficaz. Un inhibidor es una sustancia que se adhiere en pequeñas concentraciones en condiciones de interior para disminuir la velocidad de corrosión, siendo considerado como un proceso catalítico. Existe una gran variedad de tipos y composición de los inhibidores, que son desarrollados por experimentaciones empíricas y otros son naturales y su composición no es divulgada. El proceso de inhibición no se entiende completamente, pero se conoce de acuerdo al tipo de corrosión y ambientes agresivos el que se debe utilizar (Peterson, 1999). A continuación se explican algunos tipos de inhibidores:

1. De adsorción. Representan la cantidad mayor de inhibidores, siendo compuestos orgánicos que se adhieren a la superficie metálica como un proceso de adsorción, suprimiendo la disolución del metal y reduciendo las reacciones que se presentan. En ocasiones este inhibidor afecta al proceso anódico y catódico, pero en otros casos no ocurre nada. Las aminas orgánicas son los inhibidores de este tipo más comunes.

2. De evolución del hidrógeno. Tienen la función de retardar la reacción de evolución del hidrógeno y están compuestos de iones de arsénico y antimonio. Son efectivos en soluciones ácidas, pero ineficientes en ambientes con un proceso de reducción de oxígeno controlado por reacciones catódicas.

3. Eliminadores de oxígeno. Operan para eliminar los agentes corrosivos de soluciones que tienen contacto con superficies metálicas. Un ejemplo es el sulfito de sodio e hidracina, que elimina al oxígeno disuelto en soluciones acuosas.

4. Oxidantes. Son sales como cromatos, nitratos y férricas, que se utilizan en metales que muestran transiciones activas a pasivas y viceversa, como el hierro y aleaciones de hierro y aceros inoxidable. Se aplican en sistemas de enfriamiento o circuitos de circulación cerrados.

5. De fase vapor. Son similares a los de adsorción teniendo alta presión de vapor. Se usan en ambientes corrosivos que no tienen contacto directo con superficies metálicas, siendo colocados cerca de los metales para protegerlos. Son efectivos en áreas cerradas como en empaques o interiores de equipos y maquinas industriales instalados en plantas industriales.

D2 Protección anódica y catódica.

Los procesos de protección anódica y catódica reducen el proceso de la corrosión, donde cada una requiere de técnicas especializadas (Fontana, 1985). A continuación se explica cada una.

1. Protección anódica. Es una técnica aplicada con electrodos en base a principios de cinética y conceptos de electroquímica. Se caracteriza por la formación de películas protectoras en metales aplicando corrientes anódicas de manera externa al proceso que se va a prevenir de la corrosión. Para aplicar esta técnica, se requiere de un potencióstato, que es un instrumento electrónico que mantiene un potencial constante aplicado a un

metal con respecto a un electrodo de referencia. La protección anódica disminuye la velocidad de corrosión sustancialmente.

2. Protección catódica. Se empezó a aplicar antes de desarrollarse la ciencia de la electroquímica, basándose en la corrosión de un metal cualquiera en un medio ácido. En esta técnica se adhieren electrones a la estructura metálica que se debe proteger, para suprimir la disolución del metal e incrementar la velocidad de la evolución del hidrógeno. Existen dos formas de llevar a cabo esta técnica: **(1)** por una fuente de corriente directa externa conectado el negativo al material a proteger y el positivo a un ánodo inerte como grafito y **(2)** por un acople galvánico. El ánodo usado para este tipo de protección se le denomina ánodo de sacrificio, que es el que se consume y protege a las instalaciones y equipos. La selección del ánodo se basa en consideraciones de ingeniería y económicas. La protección catódica se utiliza por ser mas económica que la anódica, y se considera un arte más que una ciencia.

D3 Recubrimientos.

La aplicación de películas que cubren las superficies metálicas sirve para protegerlos de ambientes agresivos (Fontana, 1985). Existen diversos tipos de recubrimientos como los que se mencionan a continuación:

1. Metálico o inorgánico. Son delgados y proveen una buena barrera que protege al metal, siendo aplicado por el proceso de electro deposición, rociador con flama, revestimiento, inmersión en caliente y deposición de vapor. Los procesos de este tipo de recubrimiento se explican a continuación:

a) Electro-deposición. También se le llama electro-plateado, que consiste en sumergir el área que será protegida en una solución y aplicando una corriente entre la superficie a cubrir y un electrodo de apoyo para el proceso. Este proceso depende de la temperatura, densidad de corriente, periodo de tiempo y la composición de la solución donde se realiza el baño. El electro plateado puede ser un solo metal, películas de varios metales o composición de aleaciones metálicas. La mayoría de los metales se pueden usar para este proceso.

b) Rociador con flama. También se le llama metalización, y consiste en adherirle a un metal una película metálica por medio de un rociador con flama sobre la superficie a cubrir. Por lo regular se usa el oxígeno y acetileno, además del propano. Los recubrimientos son porosos y no protegen adecuadamente en ambientes corrosivos con humedad. La superficie a proteger debe ser rugosa para obtener una buena unión mecánica.

c) Revestimiento. Se depositan en forma de hojas metálicas con películas superficiales. La capa de revestimiento es muy delgada y en ocasiones se realiza el proceso de soldado para cubrir superficies metálicas.

d) Inmersión en caliente. Se aplica a metales por inmersión en baños de otro metal fundido a alta temperatura, siendo el acero galvanizado, el ejemplo más representativo. El grosor de las películas es mucho mayor que el proceso de electro plateado ya que durante el proceso se da una interacción química entre el sustrato y el metal fundido.

e) Deposición de vapor. Se realiza en una cámara de vacío, donde el metal cubierto se vaporiza por equipos eléctricos que generan calor y el vapor se deposita en las superficies

a proteger. Es el método más costoso y se limita a cierto tipo de aplicaciones, por ejemplo en misiles militares y cohetes.

Los métodos para realizar el proceso de recubrimiento se muestran enseguida:

i) Difusión. Se genera por tratamiento de calor para formar la aleación, realizando la difusión de un metal en otro, siendo llamado aleación superficial.

ii) Conversión química. Son realizados por la corrosión de una superficie metálica que forma un producto corrosivo adherente y protector. La anodización consiste en la oxidación anódica en un baño ácido que construye una capa de óxido.

iii) Modificación de la superficie. Los tratamientos de superficie involucran energía y son considerados de importancia. Se usan cuando ciertas aleaciones metálicas no se pueden adherir a los metales.

iv) Implantación de iones. Se aplican iones para modificar las superficies que se protegerán.

2. Recubrimientos orgánicos. Los principales tipos de recubrimientos orgánicos son los barnices, lacas y pinturas que protegen más las superficies metálicas. En los Estados Unidos, se gastan aproximadamente 2 millones de dólares al año en este tipo de recubrimientos. Existen tres tipos de factores para un buen uso de los recubrimientos orgánicos: **(1)** preparación de la superficie a proteger, **(2)** selección de la capa primaria y **(3)** selección de la capa superior. Los tres factores deben llevarse a cabo de manera adecuada para se realice una buena protección. Existen algunos métodos para reducir los costos por el uso de pinturas: **(1)** después del proceso del recubrimiento, pintar sólo en las

partes más afectadas y (2) aplicar la pintura con rociador, (3) aplicar la película en los bordes de la superficie y (4) diseñar la estructura de tal manera que se presente la menor cantidad de área de exposición.

D4 Diseño estructural.

Es indispensable para lograr una buena resistencia a la corrosión de artículos y equipos industriales. En este, son importantes factores como el material y la estructura, propiedades mecánicas, el grosor del material y las reglas de diseño. Algunas reglas consideradas son el uso y mantenimiento de equipos e instalaciones industriales:

1. Soldar adecuadamente las instalaciones y tanques industriales, así como diseñar las instalaciones y tanques con sistemas de drenado adecuados.
2. Diseñar los equipos industriales para fácil reemplazo de componentes y evitar esfuerzos mecánicos excesivos y exponer los equipos a ambientes agresivos.
3. Diseñar instalaciones y equipos para acumulación de humedad y contaminantes y evitar usar metales distintos en contactos eléctricos.
4. Proveer estructuras muy densas para evitar fácil deterioro de los materiales.
5. Seleccionar los materiales necesarios, conocer sus especificaciones y no usar materiales heterogéneos.
6. Seleccionar los estándares ASM, ASTM, ISO, etc., a utilizar.
7. Especificar procedimientos de prueba y almacenamiento, así como operaciones y mantenimiento.
8. Proveer de climas controlados con flujos de aire (humedad y temperatura), así como la adecuada ubicación de las plantas industriales de acuerdo al flujo de viento y reducir zonas de aireación extrema.

ANEXO “E”

E Equipos de monitoreo y análisis de la corrosión atmosférica.

El nivel de deterioro de la corrosión en materiales metálicos se conoce por medio de métodos y técnicas utilizadas por equipos especializados que muestran el daño con valores numéricos o niveles de referencia. Existen algunos equipos de gran importancia para monitorear la generación y velocidad de corrosión, como los que se muestran a continuación.

E1 Equipos de monitoreo de contaminantes del aire.

En la ciudad de Mexicali se tienen instaladas Estaciones de Monitoreo Ambiental (EMA) de la EPA/US, que detectan la presencia de contaminantes del aire como el CO, NO_x, O₃ y SO₂, que son registrados y almacenados en una base de datos para ser analizados. Los monitores de detección de los contaminantes del aire tienen diferentes maneras de operar:

a) Monitor de CO. Detecta concentraciones de CO con una luz infrarroja no dispersa a través de un filtro en forma de rueda que está rotando unida a una celda muestra y al detector. La rueda contiene para detectar dos contaminantes: CO y nitrógenos. El lado del CO de la rueda actúa para producir un rayo de referencia que no debe afectar a la celda de la muestra. El lado del nitrógeno es transparente a la radiación infrarroja y produce un rayo de la medida que se pueda absorber por el CO en la proporción no lineal de la concentración del CO. El detector convierte la luz a la energía eléctrica, y el sistema electrónico del proceso de señal manipula la información eléctrica y exhibe la concentración del CO. El error no debe ser mayor al 0.5%, y se debe de ajustar a 0 cada

24 o 72 horas. Los rangos de medición varían de 0.5 a 1000ppm siendo el mínimo de 0.5ppm.

b) Monitor de NO, NO₂ y NO_x. Tiene tres secciones con dispositivos que suministran el voltaje necesario de 0.1 a 1 voltio, de acuerdo a cada tipo de óxido de nitrógeno a monitorear NO, NO₂ y NO_x, permitiendo una lectura permanente y proporcional a la medición de cada gas con los filtros de detección. Contiene un detector de presión para mantener la zona de detección del gas al vacío y generar lecturas correctas. Para el almacenamiento de la información se tiene una memoria electrónica. El tiempo de respuesta en al detección de cada gas es de 10 a 300 segundos y tener un depurador para eliminar el amoniaco (NH₃) del área de detección. Los tres analizadores detectan concentraciones desde 50 ppb hasta 20 ppm, siendo aprobados por la EPA-US, en los rangos de 0 a 50, 0 a 100, 0 a 200, 0 a 500 ppb y de 0 a 1ppm, siendo el mínimo detectable de 0.4ppb con una precisión de ± 0.5 ppb o de 0.5% de error para cualquier lectura en un periodo de 24 horas o del 2% en 30 días. Al detectar el gas la fuente de voltaje de 115 voltios, puede variar en un rango de ± 10 voltios. Se debe de presentar un ruido eléctrico en cada lectura permisible de 0.2ppb cada 60 segundos. Un cambio de temperatura de 4 °C a 44 °C, no varía la lectura de cada gas, pero mayor a ese rango sí lo hace. Se tiene un sistema de detección, recolección y almacenamiento de los datos de cada gas por medio de conexiones eléctricas y memorias electrónicas. Los analizadores deben recibir mantenimiento cada 12 meses, y no estar expuestos a vibraciones de transporte o de otro tipo.

c) MONITOR de O₃. Constituido por dispositivos que suministran el voltaje necesario de 0.1 a 1 voltios. La escala tiene un rango de medición de 100 a 10,000 ppb siendo el

mínimo detectable de 0.6ppb con una precisión en cada lectura de 1% y linealidad de 1% en un periodo de 7 días. El tiempo de respuesta después que el gas es detectado por el filtro es de 20 segundos. El ruido eléctrico debe ser de 0.3ppb o de 1% en cada lectura y un cambio en la temperatura de ± 20 °C, pero mayor a este rango si lo hace. Se tiene un sistema de detección, recolección y almacenamiento de los datos de cada gas por medio de conexiones eléctricas y memorias electrónicas. Los analizadores deben recibir mantenimiento cada 12 meses, y no estar expuestos a vibraciones de transporte o de otro tipo. La transferencia de datos del gas debe ser compatible al estándar de ARB perteneciente a la EPA-US con memorias de almacenamiento de 800 horas (33.3 días, operando las 24 horas al día). La temperatura y presión deben ser compensadas automáticamente por un microprocesador electrónico. El sistema analizador interno debe generar una concentración de ozono de al menos 1ppm en un flujo de 700 cc/minuto y su concentración detectada no debe ser mayor al 2% en un periodo de 7 días. Los datos se obtienen en periodos de cada 5 minutos desde que inicia el proceso de monitoreo y el analizador debe contener una realimentación de la entrada de la detección del gas a la salida que proporciona la información numérica.

d) Monitor de SO₂. Contiene dispositivos electrónicos que en conjunto con los filtros de detección, almacenan y procesan los datos para obtener la información del monitoreo de este gas. La bomba de presión al vacío debe estar ajustada a 10 pulgadas de mercurio (Hg). El cero representa 0.4 ppm con en rango de 110 a 125 voltios y el error no debe exceder de 1% en 24 horas y 2% en 72 horas, evaluándose automáticamente esto cada 10 minutos. Las respuestas del analizador por los cambios de voltaje en ± 0.01 ppm. Los rangos de medición son de 0.1 a 1000 ppm siendo el mínimo de 0.1 ppm.

E2 Equipos de análisis superficial.

Para una mejor visualización y entendimiento del fenómeno de la corrosión de manera de un análisis superficial en metales, se realizan pruebas no destructivas a nivel microscópico con instrumentación electrónica especializada como lo son:

a) Analizador de microscopia por barrido electrónico. Utilizado para evaluar partículas o gases que se adhieren a los metales y no se detectan a simple vista, de manera microscópica. Ese instrumento proporciona resultados de porcentajes de cada componente que esta adherido al metal y fotografías de la morfología del proceso de corrosión. Por sus siglas en inglés se le conoce como Scanning Electron Microscopy (SEM).

b) Analizador de rayos X de electrones dispersados. Se utiliza una cámara de vacío y por ello es común se encuentre acoplado al SEM, cuenta con un detector que captura los electrones secundarios de rayos X, los cuales posteriormente dan indicaciones semicuantitativas del contenido de los elementos químicos presentes en la muestra de corrosión . Por sus siglas en ingles se le conoce como Energy Disperse X Ray Spectroscopy (EDS).

c) Espectroscopia infrarroja. Se usa de manera exitosa para análisis químico continuo con una región de especto electromagnético generado por ondas de 0.8 a 1000 μ m, expresados en términos de frecuencia como número de ondas por centímetro (de 12500 cm^{-1} a 10 cm^{-1}). Permite caracterizar principalmente compuestos orgánicos como inhibidores de corrosión o recubrimientos poliméricos orgánicos utilizados en la protección anticorrosiva del metal o aleación.