



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE
PRUEBAS ACELERADAS DE
CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN
MACROCOMPONENTES
ELECTRÓNICOS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A:

IGNACIO CUEVA GÜITRÓN

DIRECTOR DE TESIS

DR. ARMANDO ORTIZ PRADO





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**CD. UNIVERSITARIA
NOVIEMBRE
DE 2005**

ÍNDICE

Prólogo

Capítulo 1. Corrosión atmosférica

1.1 Antecedentes	1
1.2 Conceptos básicos de corrosión	2
1.3 Corrosión atmosférica	3
1.4 Corrosión atmosférica en equipo electrónico	8

Capítulo 2. Sistemas de almacenamiento magnético de datos (SAMD)

2.1 Introducción	15
2.2 Características generales de los (SAMD)	15
2.2.1 Material de soporte magnético	17
2.2.2 Cabezal de lectura/escritura	18
2.3 Influencia de la atmósfera en el deterioro de (SAMD)	20
2.4 Mecanismos a través de los cuales se genera el deterioro en (SAMD)	20
2.5 Metodología para la determinación del efecto de la atmósfera en el deterioro de (SAMD)	22

Capítulo 3. Funcionamiento de la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica (CAPACA)

3.1 Antecedentes generales de CAPACA	25
3.2 Descripción de CAPACA	26
3.3 Descripción de la programación de los ensayos	29
3.4 Procedimiento para la puesta en marcha de CAPACA	33
3.5 Operación automática de CAPACA	35

Capítulo 4. Componentes electrónicos y procedimiento de ensayo

4.1 Descripción de los componentes electrónicos	37
4.1.1 Descripción de los métodos de manufactura de los circuitos integrados (CI)	38
4.1.2 Problemática del encapsulado de CI	39
4.1.3 Pruebas de corrosión a componentes electrónicos	41
4.2 Procedimiento de prueba e inspección	42
4.2.1 Preparación de las muestras	43
4.2.2 Exposición de los dispositivos a condiciones atmosféricas simuladas	43

4.2.3 Consideraciones para la evaluación del daño de los especímenes	44
4.2.4 Desarrollo de las pruebas	46
4.3 Metodología para la determinación del deterioro de componentes electrónicos	48
4.4 Inspección de macrocomponentes	52
4.4.1 Muestras obtenidas de campo	53
4.4.2 Muestras expuestas a pruebas de laboratorio	56
4.4.3 Muestras de SAMD expuestas a pruebas de laboratorio	58
4.5 Discusión	62
<i>Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones</i>	65
<i>Referencias</i>	68
<i>Anexo</i>	71

Prólogo

La experiencia adquirida durante el diseño y construcción de una cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica ha permitido involucrarse de una mayor forma en los procesos de corrosión por efectos ambientales. Por otra parte se ha despertado gran interés en los inconvenientes que por corrosión se manifiestan en componentes electrónicos sean estos micro o macro, así como los efectos en Sistemas de Almacenamiento Magnéticos de Datos (SAMd).

El deterioro que se manifiesta en componentes electrónicos por acción del medio ambiente no representan una pérdida de masa considerable, lo que ha llevado a desarrollar metodologías que representen una alternativa viable para la evaluación de estos daños. Con base en lo anterior se plantearon objetivos generales como; reproducir los ambientes típicos que se presentan en regiones características de la República Mexicana (secos, tropicales, lluviosos, etc.) a la vez de simular de manera acelerada los efectos que se manifiestan en macrocomponentes electrónicos y SAMd. Todo con la finalidad de desarrollar modelos matemáticos que correlacionen la vida útil de estos componentes en un ambiente determinado.

El presente trabajo consta de cinco capítulos y un anexo en los que se desarrollan diferentes temas relacionados con la corrosión atmosférica y los efectos de ésta en macrocomponentes electrónicos, la simulación acelerada en pruebas de laboratorio y su relación de manera cualitativa con los efectos producidos en los especímenes en pruebas de laboratorio con los observados en campo.

En el capítulo uno se presentan conceptos básicos sobre corrosión atmosférica así como antecedentes de las pruebas utilizadas para la simulación acelerada en componentes electrónicos. Asimismo se presenta una clasificación de los diferentes niveles de agresividad para este tipo de componentes o dispositivos de acuerdo con algunas normas internacionales.

En el capítulo dos se realiza una descripción de las características y funcionamiento de los SAMd y los principales factores que favorecen al deterioro por corrosión atmosférica, los cuales afectan de manera sensible al buen funcionamiento de estos sistemas.

En el capítulo tres se describe el funcionamiento de la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica desarrollada en la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales. Se efectúa una descripción de la puesta en marcha de la cámara, además de una breve explicación del programa de cómputo destinado al control de ciclos.

En el capítulo cuatro se analizan las características e inconvenientes de la miniaturización, así como los materiales empleados en la manufactura de los componentes electrónicos y las fallas producidas por la exposición al ambiente. Por otra parte se presentan los procedimientos de prueba e inspección de las muestras de campo, así como, las de laboratorio. Además se presenta una discusión de los resultados de las pruebas realizadas.

Se presenta también un anexo donde se muestra la evolución que ha tenido desde un inicio la interfase gráfica de la cámara destinada a realizar las pruebas aceleradas de corrosión atmosférica.

Cabe mencionar que la problemática de la corrosión atmosférica en equipo electrónico es de tal complejidad que hasta ahora solo se cuenta con evaluaciones de manera cualitativa ya que se tienen limitaciones como son las dimensiones y las pérdidas de peso de los componentes electrónicos y la velocidad con que esto ocurre.

Para llevar a efecto las pruebas aceleradas de corrosión atmosférica se han desarrollado una serie de procedimientos para garantizar la veracidad de los experimentos evitando la contaminación por agentes externos, durante la manipulación de las muestras se deben tomar las precauciones necesarias y de esta forma obtener resultados realistas.

El presente trabajo tiene como propósito dar continuidad a una línea de investigación que si bien es compleja por todos los procesos que implica, es conveniente que los ingenieros mecánicos se involucren en los procesos de corrosión y asuman responsabilidades en cuanto a la selección de materiales para el diseño de piezas mecánicas, sino también en otras áreas, como puede ser el caso de componentes electrónicos.

Finalmente agradezco al personal de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales por el gran apoyo brindado, muy especialmente al Dr. Armando Ortiz Prado coordinador de la Unidad por los valiosos conocimientos aportados durante el desarrollo del trabajo, al Dr. Víctor Hugo Jacobo por sus apreciables consejos y la revisión del trabajo, al Ing. Efraín Ramos Trejo por su amistad y apoyo en el diseño y construcción de la cámara de pruebas, al Biólogo Germán Álvarez por su excelente labor en la inspección de las muestras en el microscopio electrónico de barrido (SEM), a mis compañeros de trabajo Roberto Cisneros, Edgar Isaac Ramírez y Jorge Luis Romero.

Capítulo 1 Corrosión atmosférica

1.1 Antecedentes

El fenómeno de la corrosión se ha venido observando desde la antigüedad. En un principio solo se tenían algunas teorías acerca del porqué algunos metales sufrían deterioro bajo ciertas condiciones ambientales. Con los avances tecnológicos se han desarrollado nuevos métodos que han ayudado a determinar la velocidad de corrosión de forma rápida y económica para diferentes materiales.

En el fenómeno de la corrosión de los metales intervienen reacciones químicas o electroquímicas por efectos del ambiente, en la degradación de los materiales metálicos debe existir un medio agresivo circundante para hacer referencia a los procesos de corrosión. Este efecto que no necesariamente ocurre en los materiales como son polímeros y cerámicos ya que son otros los mecanismos que originan la degradación.

En las últimas tres décadas se ha puesto gran atención a los problemas derivados de la corrosión atmosférica no solo por las pérdidas y daños materiales que esto representa, sino también por los efectos ambientales que se pueden derivar. Lo anterior ha despertado el interés en los gobiernos e investigadores de varios países actuando con medidas preventivas y correctivas ante los problemas derivados por la corrosión atmosférica.

Los daños causados por la corrosión y degradación de los materiales representan una pérdida significativa en términos económicos de aproximadamente 3.5% del producto interno bruto (PIB) de países industrializados del continente Europeo [1]. Por esta razón se derivan suficientes elementos que justifican el estudio de los mecanismos que provocan el deterioro de los materiales por efectos ambientales

En la medida que se disponga de mayores conocimientos sobre los mecanismos que inducen el deterioro de los materiales, resultado de su exposición a condiciones atmosféricas. se logrará aportar alternativas que permitan disminuir la velocidad de corrosión, y de esta forma prolongar la vida útil de los materiales que por efectos de la agresividad del ambiente, sufren estos un deterioro anticipado.

Es importante mencionar el papel que actualmente desempeñan grupos multidisciplinarios en contra de la corrosión, desde la selección y protección de los materiales de acuerdo a su funcionalidad y el ambiente en que han de operar, esto para protegerlos de los mecanismos que promueven la corrosión y disminuir los efectos que sobre los materiales se presentan.

Asimismo, el personal involucrado en procesos industriales deben tener presente los efectos desfavorables que se originan en los materiales bajo ciertas condiciones ambientales, con el fin de prevenir estos efectos.

Por tal motivo, desde la etapa de diseño se deberán considerar medidas preventivas ya que la posibilidad de que ocurran daños por corrosión en etapas como la manufactura, ensamble, almacenamiento, etc., está siempre presente. El conocimiento de los factores ambientales involucrados durante un proceso de manufactura tales como temperatura de trabajo, gases presentes en el área, humedad del ambiente etc.; conllevan a tomar las medidas pertinentes que reduzcan los efectos en los materiales involucrados en los procesos. Los factores mencionados favorecen el inicio de la corrosión en los materiales metálicos, aunado al ambiente natural participan de manera conjunta los factores producto de los desechos y reacciones de los propios procesos generando condiciones que afectan de manera sensible a las instalaciones de las fábricas y sus alrededores. Una vez conocida la agresividad del ambiente, es posible tomar las medidas preventivas o correctivas y de esta forma lograr disminuir las pérdidas económicas, que por corrosión afectan a zonas particulares y de manera global a una nación.

De acuerdo a lo establecido en las normas relacionadas con procesos de corrosión y lo reportado en la literatura [2,3,4]. Los factores más importantes que promueven la corrosión son:

- ◆ Variación de temperatura
- ◆ Variaciones de la humedad
- ◆ Contaminantes gaseosos presentes en el aire (composición, concentración)
- ◆ Partículas suspendidas (composición, tamaño y concentración)
- ◆ Tiempo de exposición

Si bien la mayoría de los estudios se han desarrollado con un particular enfoque a corrosión en exteriores y se considera ésta como la más agresiva, es necesario considerar el efecto que tienen los diferentes contaminantes en el deterioro de los equipos expuestos en interiores, en donde la presencia de humedad sobre las superficies metálicas se debe a fenómenos de condensación y absorción de moléculas de agua presentes en el aire.

Cabe mencionar que la agresividad del ambiente depende de varios factores que al combinarse dan lugar a la presencia de fallas o deterioro considerable en los materiales, así mismo las propiedades de estos juegan un papel determinante en la velocidad con que el deterioro puede mostrarse.

1.2 Conceptos básicos de corrosión

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

Durante muchos años se han estudiado los mecanismos que dan lugar a los procesos de corrosión y para que la corrosión pueda llevarse a efecto deben estar presentes un gran número de variables. Un cierto número de éstas depende de las propiedades físicas y químicas de los materiales. Otras

están relacionadas con el medio ambiente tales como el tipo y concentración de agentes corrosivos que pueden provocar reacciones que deriven en el fenómeno de corrosión.

Un número de factores que ejercen una considerable influencia sobre los procesos corrosivos de los materiales tienen lugar bajo condiciones distintas de operación. Algunos ejemplos de estos son diferencia de potencial, temperatura, esfuerzos, velocidad del aire y tamaño de partículas presentes en el ambiente.

En las últimas tres décadas se han logrado grandes avances en las mejoras a los métodos analíticos para estudiar y cuantificar los productos de corrosión y tener una respuesta completa con relación a los parámetros ambientales y su relación con los efectos producidos por la corrosión. Esto lleva a un conocimiento integral acerca de los productos de la corrosión, así como los parámetros ambientales que intervienen.

Sin embargo, aún no son completamente conocidas las velocidades con que ocurren las reacciones en los procesos de corrosión, esto resulta ser bastante complejo, ya que se involucran reacciones químicas no solo con la superficie del metal, sino también con los productos de corrosión de manera simultánea.

1.3 Corrosión atmosférica

La corrosión atmosférica es el deterioro que sufren los materiales metálicos cuando se encuentran en contacto con los diversos gases que componen el aire. Debido a la gran cantidad de metal expuesto a la atmósfera se estima que alrededor del 50% de las pérdidas económicas totales por corrosión se producen como consecuencia de fenómenos de corrosión atmosférica [5].

La característica atmosférica más importante que se relaciona directamente con el proceso de corrosión atmosférica es la humedad, que es el origen del electrolito, esto también es proporcionado por otras fuentes como: precipitación, absorción de moléculas de agua presentes en el aire las que se depositan sobre la superficie metálica, etc.

De acuerdo a lo establecido por las normas ISO 9223; 1992 (E) [6,7,8,9] relacionadas con procesos de corrosión atmosférica, los factores más importantes que la promueven son los siguientes:

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

Existe una relación estrecha entre la corrosión atmosférica y el espesor de la capa del electrolito sobre la superficie metálica. Para que la corrosión se presente en espesores pequeños de condensado, la resistencia óhmica del electrolito sobre la superficie metálica debe ser baja, ya

que la disolución del metal es difícil en estos casos. Conforme aumenta el espesor disminuye la resistencia de la capa del electrolito, lo que origina un aumento en la velocidad de corrosión hasta que alcanza un nivel máximo, que disminuye después con el aumento del espesor. En esta zona, la reacción catódica es determinante en el proceso de corrosión; el factor óhmico y la polarización anódica pierden importancia, pues la difusión de oxígeno, en la superficie metálica es muy lenta y por tanto determinante del proceso global.

Cuando se alcanza el nivel de humedad crítico para la formación de pilas de corrosión, comienza a ser importante un segundo factor, los contaminantes atmosféricos. El efecto de los contaminantes sobre la corrosión en materiales metálicos bajo estas condiciones toma importancia. Los contaminantes atmosféricos son transportados principalmente en dos formas a la superficie de los metales, es decir en un proceso seco y en uno húmedo. Esto lleva al hecho que los constituyentes atmosféricos encontrados sobre la superficie de los metales son tan abundantes como en la atmósfera misma.

Así pues esta humedad crítica, depende del tipo de producto de corrosión o sales formadas sobre la superficie y por consiguiente el tipo de metal y contaminantes presentes en el ambiente. Por otra parte, el electrolito formado sobre la superficie del metal, es una precondition no solo para que la reacción electroquímica tenga lugar sino también para la absorción de los contaminantes y procesos significativamente rápido desde que ellos son transportados en el electrolito permitiendo el depósito sobre la superficie del material.

En los procesos de corrosión atmosférica se han reportado valores de humedad que se consideran críticos como aquellos del orden al 40% y, para procesos de corrosión de manera acelerada cuando esta alcanza valores entre el 70 y 90 por ciento [10,11]. Para el caso de los componentes electrónicos los valores de humedad pueden estar por debajo de los porcentajes mencionados.

Los efectos que la atmósfera tiene sobre los materiales dependen principalmente de las concentraciones de gases como el ozono, óxidos de azufre, cloro, óxidos nitrosos, partículas suspendidas y con menores efectos otros gases que también se encuentran presentes en ésta. Una atmósfera rica en alguna de estas sustancias es una condición que favorece a los procesos de corrosión.

Como el mecanismo de corrosión atmosférica es electroquímico, su característica principal es la presencia de un proceso anódico y un catódico, con un electrolito de resistencia óhmica determinada. El electrolito es una capa de humedad sobre la superficie del metal cuyo espesor puede variar desde capas muy delgadas (invisibles al ojo humano) hasta capas que mojan perceptiblemente el metal. La duración del proceso de corrosión depende sobre todo del tiempo durante el cual la capa de humedad permanece sobre la superficie metálica.

Los materiales expuestos a la atmósfera sufren daños tanto directamente por corrosión, como por problemas derivados de la propia interacción del equipo con el ambiente (humedad, gases contaminantes, cloruros y agentes que favorecen el proceso corrosivo, como el ozono y la luz ultravioleta) actuando como elementos aceleradores en las reacciones.

Las pruebas de corrosión atmosférica en laboratorio deben tener la capacidad de lograr reales y estables condiciones de prueba. Además, es necesario realizar exposiciones con múltiples

materiales, rangos amplios de concentración de gases corrosivos y, tiempos de exposición variados desde segundos hasta semanas o meses.

El objetivo de realizar pruebas aceleradas de corrosión atmosférica a materiales tiene como objetivo deducir velocidades de corrosión para cada uno de estos, bajo condiciones de operación en ambientes diferentes y de esta manera proporcionar suficientes datos para determinar campos de aplicación y vida útil de los productos.

Es necesario resaltar los beneficios que proporciona realizar pruebas de corrosión atmosféricas de manera acelerada ya que con la información obtenida de las pruebas de laboratorio es posible la extrapolación de resultados, a periodos de exposición natural realizados durante tiempos relativamente cortos, de tal forma que los resultados de pruebas realizadas en unas cuantas semanas pueden extrapolarse a varios años de exposición natural. Asumiendo este punto de vista, el interés práctico de cada prueba se incrementa, y las pruebas son subsecuentemente más cortas y menos costosas.

Es por tal motivo que se pueden justificar los experimentos en una cámara que muestre bondades como su funcionamiento automático y mantener las condiciones idóneas que involucren a los principales constituyentes que intervienen en los procesos de corrosión atmosférica que incluyen al ozono, dióxido de azufre también comprende las reacciones con óxidos de nitrógeno para generar las condiciones que permitan acelerar los procesos corrosivos.

Para realizar las pruebas de manera acelerada es necesario mantener las condiciones que mayor efecto tienen en los procesos de corrosión. Generando las condiciones más agresivas que causan deterioro por corrosión se tienen efectos causados por los procesos corrosivos, de manera rápida.

En la figura 1.1 se presentan las diferentes etapas por las que se transitan para dar lugar al deterioro de los materiales. La primer etapa es la interacción entre el sólido y la atmósfera es la reacción instantánea de la molécula de agua con el metal. En este caso el enlace se puede dar en forma molecular (a través del átomo de oxígeno al metal o algún otro constituyente superficial de carga positiva). La fuerza dominante para la disociación del agua es la formación de enlaces metal-oxígeno o metal-oxidrilo. Los grupos oxidrilo al formarse figura 1.2 actúan como sitios preferentes para la absorción de agua.

En etapas posteriores del proceso la fase acuosa actúa no solamente como medio propicio para las reacciones electroquímicas, sino también como un solvente para los constituyentes atmosféricos sean gases o partículas. En algunos casos los constituyentes están incorporados en la capa líquida como componentes de la lluvia o el rocío. En otros casos incluye la deposición de partículas aerotransportadas.

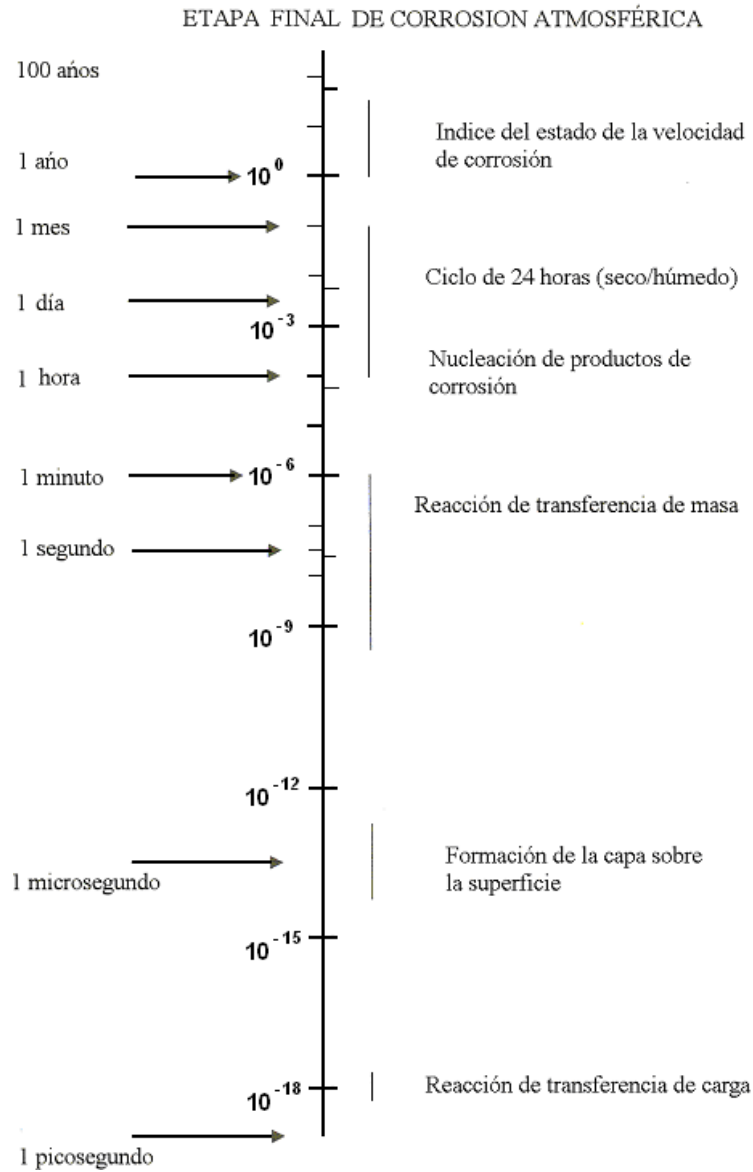


Figura 1.1 Diferentes etapas y periodos requeridos para el desarrollo de los fenómenos característicos de la corrosión atmosférica [12].

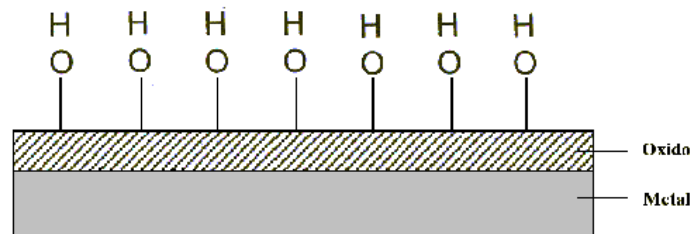


Figura 1.2. Descripción esquemática del acomodo de los iones hidróxido en la superficie formada por óxidos [12].

En la figura 1.2 se muestra una superficie metálica con una película de óxido. La formación de la capa superficial de (OH⁻) es un proceso muy rápido, ocurre en una pequeña fracción de segundo y provoca una superficie menos reactiva con el agua. Si se tiene una mayor exposición a la atmósfera, la absorción de agua será en forma molecular. En la figura 1.3 se observa la relación entre la humedad relativa y las capas de agua que actúan como electrolito en los procesos corrosivos.

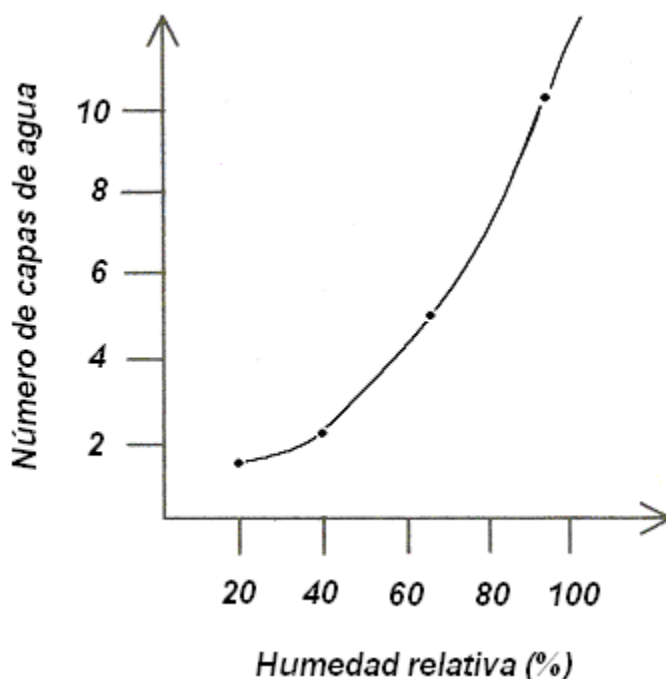
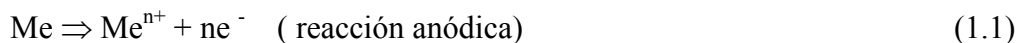
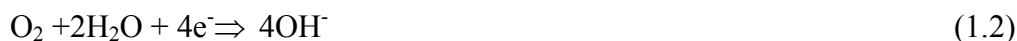


Figura 1.2. Número de moléculas de agua que dan lugar a la película higroscópica la cual depende fundamentalmente de la humedad relativa [12].

En la corrosión atmosférica las reacciones electroquímicas ocurren en la interfase entre el sustrato sólido y la capa de agua. Las pilas de corrosión galvánica producidas por heterogeneidad de las superficies dan lugar a la presencia de algunos sitios catódicos, mientras que otros predominantemente anódicos. Las reacciones dominantes en la corrosión atmosférica son:



y en estos casos las reacciones en el cátodo son:



En las pilas de corrosión galvánica bimetálica los electrones al formarse los iones metálicos en el ánodo, se mueven ya sea a través de un conductor externo, o a través de la red metálica, hacia el cátodo donde sirven para reducir el ión H⁺ o el gas O₂. En el caso en que está expuesto solo un metal la pila de corrosión supone que a lo largo de la superficie metálica se dan diferentes

concentraciones de iones o moléculas oxidantes como H^+ y O_2 , o que la constitución cristalográfica del metal varia de unas zonas a otras, las cuales diferirán entre sí en el potencial electroquímico.

En las pilas de corrosión galvánica por heterogeneidades superficiales aún cuando la concentración de oxígeno sea idéntica en todas las zonas, el metal puede sufrir corrosión si en la superficie se tienen regiones con distintos potenciales electroquímicos. Las zonas con potenciales más negativos funcionan como ánodos frente a zonas de potenciales superiores que actúan como zonas catódicas. Toda la superficie metálica se transforma entonces en una especie de mosaicos de pequeñas pilas con regiones anódicas y catódicas.

Las heterogeneidades superficiales pueden ser tales, que las zonas anódicas conservan a lo largo del proceso de corrosión un potencial más negativo que otras zonas de la superficie. En este caso se da una corrosión localizada pero puede suceder también que durante el ataque corrosivo las zonas anódicas adquieran un potencial más positivo (formación de una capa de óxido), con lo que se puede invertir la polaridad de pequeñas zonas, operando como cátodo las zonas que antes actuaban como ánodo.

1.4 Corrosión atmosférica en equipo electrónico

El equipo electrónico es propenso a sufrir deterioro por diversas razones que pueden ser efectos eléctricos, magnéticos, mecánicos y químicos. Entre las causas más importantes de la degradación química está la corrosión atmosférica. Las fallas en los equipos electrónicos se dan no solo de manera permanente sino también temporal o intermitente, las causas de estas fallas obedecen a diferentes mecanismos que las ocasionan, sin embargo, tienen particular interés las fallas producto de la corrosión atmosférica en estos equipos.

El deterioro que sufre el equipo electrónico por efectos ambientales tiene características especiales debido a las condiciones que se encuentren presentes en la zona, estas condiciones conllevan a fallas en los componentes de los sistemas. Las fallas manifiestas en estos equipos impactan de diferente manera dependiendo de la función que desempeñen estos.

La corrosión causada a componentes o partes electrónicas es con frecuencia más crítica que la corrosión de otros objetos, tales como los materiales estructurales, porque esta degradación afecta las propiedades eléctricas del dispositivo (conductancia, resistencia, etc.), y así impacta al desempeño. El funcionamiento de los dispositivos depende en gran manera de los requerimientos de la circuitería donde se encuentra el componente, y en general, las fallas inducidas por corrosión atmosférica no se pueden definir de una manera confiable. En materiales de conectores o de contactos, pueden provocarse fallas por mínimas cantidades de productos de corrosión (difícilmente se aprecia a simple vista o incluso con un microscopio) en parte por la tendencia a que las señales de voltaje sean cada vez menores. Pequeñas cantidades de residuos de contaminantes de cloro en un circuito integrado encapsulado pueden originar corrosión severa del patrón conductivo y migración iónica entre los caminos conductores. El problema se agrava con pares de metales no similares, que crean condiciones para corrosión bimetalica, pequeñas

metalizaciones, y enormes gradientes de potencial eléctrico en las metalizaciones, así como por el uso de materiales que han sido seleccionados sin tomar en cuenta la resistencia a la corrosión como primer parámetro de elección.

Las fallas en equipos electrónicos inducidas por corrosión atmosférica se tienen no solo en las industrias, que generalmente se encuentran en zonas urbanas, sino también en ambientes rurales donde se tiene la influencia de los productos utilizados para los cultivos así mismo los fenómenos ambientales en las zonas costeras causan mayor impacto en el deterioro de los equipos electrónicos ya que sufren severos daños causados por los cloruros. Se ha determinado a través de investigaciones previas sobre las condiciones que causan corrosión en equipo electrónico [13,14], el deterioro sufrido, es inducido por concentraciones de contaminantes menores a las toleradas para el ser humano. Los problemas relacionados con la corrosión en tales ambientes son factores cruciales para la confiabilidad de la electrónica debido a las elevadas susceptibilidades de la circuitería a la presencia de contaminación gaseosa o de partículas.

El equipo electrónico es con frecuencia más susceptible a fallas tanto por las dimensiones de dichos componentes así como por los espacios que existen entre estos; ya que pérdidas de material de apenas unas micras pueden causar la falla del equipo de manera parcial o total.

Es importante notar que la concentración de contaminantes en exteriores así como en interiores se ve influenciada por las características particulares de la zona, sin embargo se tienen antecedentes [14], que demuestran que las diferencias entre las concentraciones no necesariamente son significativas.

Dado que los materiales conductores que forman al interior de un microchip son cada vez más reducidos en cuanto a sus dimensiones, del orden de micras o menores, esto incrementa la sensibilidad a la presencia de humedad y contaminantes. Para protegerlo de estas condiciones que resultan desfavorables, los micros son encapsulados en plástico rígido que no absorbe humedad, sin embargo los materiales utilizados para su encapsulado son susceptibles a micro fisuras u otros diminutos defectos que si bien pequeños son capaces de permitir la absorción de humedad y el alojamiento de contaminantes, los cuales causan un efecto desfavorable para los materiales encapsulados. Por otra parte, el deterioro que sufren los conductores no solo se debe a defectos en el encapsulado sino también a procesos de manufactura de los propios conductores. Una vez que se tiene conocimiento de los factores que originan el deterioro en los micros, el siguiente paso es tener un estricto control en los procesos de manufactura y disminuir la posibilidad de que estos efectos negativos se presenten.

Como en otras formas de corrosión atmosférica, pueden ocurrir varios procesos de corrosión cuando los conductores metálicos se exponen a la humedad y a los contaminantes. Estos procesos incluyen disolución electrolítica, picaduras, migraciones iónicas y corrosión galvánica. La disolución electrolítica y las picaduras se dan en conductores de aluminio en presencia de diferencia de potencial eléctrico entre los hilos conductores. Cuando hay humedad, el conductor que posee el potencial eléctrico más alto forma el ánodo de una celda de corrosión y el metal conductor puede disolverse. Cuando los contaminantes contienen cloruros, la disolución del aluminio ocurre en forma semejante a las picaduras, y el dispositivo puede fallar por una discontinuidad en el conductor. Los productos de la reacción, tales como el hidróxido de aluminio pueden precipitarse fácilmente debido al volumen pequeño de electrolito. Estos productos pueden fomentar reacciones electroquímicas más fuertes en el conductor de aluminio.

Los conductores hechos de otros metales, tales como el cobre, también se pueden disolver de manera anódica y fallan por picadura y disolución electrolítica. Los iones de metal disueltos migran hacia el conductor opuesto. Aun si la diferencia de voltajes entre los conductores es bastante pequeña, la migración iónica (a veces llamada electro migración o migración electrolítica) puede ocurrir debido a que las pequeñas distancias entre conductores crean elevadas fuerzas de campo eléctrico. Cuando los iones metálicos llegan al conductor opuesto, polarizado catódicamente, los iones se pueden depositar comúnmente siguiendo un patrón de dendrita. Este patrón es mucho más voluminoso que el volumen correspondiente de metal disuelto y puede resultar en un corto circuito entre los hilos conductores adyacentes. Mientras más se reduzcan las dimensiones de los circuitos integrados, la disolución electrolítica y la migración iónica tienen el potencial para convertirse en mecanismos de falla aun más importantes en el futuro.

Es posible que las pérdidas eléctricas puedan ser causadas por mecanismos diferentes no solo por disolución de iones sino también por la presencia de humedad (de apenas unas cuantas moléculas de agua) aunado al efecto de partículas transportadas por ésta hasta las superficies metálicas, que para las dimensiones que poseen los materiales conductores suelen ser motivo suficiente para que la falla pueda presentarse.

Otra de las causas de falla por corrosión en circuitos integrados, también tienen lugar si no se aplica voltaje, siempre y cuando existan agentes corrosivos en el ambiente. Otro proceso, la corrosión bimetalica (corrosión galvánica), ocurre en presencia de humedad cuando dos metales no similares están en contacto eléctrico, formando una celda galvánica. La fuerza motriz es la diferencia en la nobleza electroquímica. La corrosión bimetalica en los circuitos integrados puede existir, por ejemplo, en uniones de aluminio conectados a alambres de oro.

La tabla 1.1 es un resumen de las pruebas más utilizadas en contactos y conexiones del Instituto Battelle de los Estados Unidos (Prueba de flujo de gas mezclado, *Flowing mixed gas test II* o FMG II), de IBM (Prueba G (I)), y de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, prueba 68-2-60), respectivamente.

Tabla 1.1 Clasificación de ambientes con respecto a su grado de corrosividad [15].

Prueba	SO ₂ (ppbv)	NO ₂ (ppbv)	Cl ₂ (ppbv)	H ₂ S (ppbv)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)
FMG II		200	10	10	70	30
G(I)	350	610	3	40	70	30
IEC 68-2-60	200	20	10	10	75	25

Las pruebas aceleradas para circuitos integrados se basan en condiciones de polarización eléctrica y se realizan exponiendo el dispositivo a altas temperaturas y humedades relativas idóneas para propiciar la corrosión de manera acelerada. Las pruebas de laboratorio son cada vez más severas con el objetivo de garantizar la durabilidad de los componentes electrónicos bajo condiciones de operación en condiciones extremas.

A la fecha no se cuenta con una prueba que permita regular los ensayos de corrosión enfocados a tarjetas electrónicas o componentes de éstas en general, para poder predecir el daño sufrido

debido a las condiciones de exposición en un ambiente determinado. La importancia de las pruebas aceleradas de corrosión atmosférica radica en encontrar los mismos mecanismos de falla que en pruebas de campo.

Ante la búsqueda de un procedimiento estandarizado enfocado a pruebas aceleradas de corrosión atmosférica en equipo electrónico se ha tomado como base el adoptado por la Sociedad Americana de Instrumentos (ISA). Este grupo de investigadores ha realizado una clasificación de los diferentes agentes contaminantes que influyen en los procesos de corrosión atmosférica.

Los contaminantes incluidos en el estándar ISA son líquidos, sólidos y gases, con la subdivisión en los líquidos en vapores y aerosoles, y la división en los sólidos en partículas de tamaños distintos. El estándar sigue dos enfoques diferentes, el primero se basa en la exposición de muestras de cobre y el análisis cuantitativo subsecuente al ataque corrosivo, el segundo es la medición de la concentración de contaminantes y los parámetros climáticos. Se utiliza al cobre para definir el ambiente en el primer enfoque porque es un metal de uso común en la electrónica y porque su comportamiento ante la corrosión está influenciado por diversos gases corrosivos, ver la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Sensibilidad de los materiales a los contaminantes atmosféricos [16].

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

A → sensibilidad alta, **M** → sensibilidad moderada, **B** → sensibilidad baja, **N** → no hay sensibilidad. Una casilla en blanco indica que no se sabe si se han hecho estimaciones experimentales.

De acuerdo al estándar, cada ambiente interior pertenece a una de cuatro clases de agresividad, etiquetadas como G1, G2, G3 y G4 (tabla 1.3), la corrosión del cobre relacionada con estas clases se determina a través de la exposición de probetas de cobre recién erosionados por al menos un mes. Para obtener un valor correcto para bajos niveles de agresividad, se recomienda una exposición de al menos tres meses, pero se prefiere una de doce. La cantidad de productos de corrosión formada se determina por reducción catódica.

Para cada clase de agresividad, el estándar ISA también brinda los niveles máximos para algunos gases corrosivos (tabla 1.4); Los datos se basan en una compilación de varias observaciones experimentales. Las clases de ambientes en interiores que se definen de esta manera, toman como base los efectos corrosivos que provocan en el cobre, de acuerdo a la tabla 1.2, siempre y cuando la humedad relativa sea menor al 50%. Siguiendo la norma ISA, se espera que el grado de corrosividad se incremente un nivel si la humedad relativa aumenta en un 10%

En la tabla 1.3 la columna izquierda contiene el nivel de severidad, la columna central indica el espesor máximo de la capa de cobre corroída y la columna derecha es una explicación de cada nivel. Todos los valores de grosor se refieren a un mes de exposición.

Tabla 1.3 Clasificación de corrosividad de acuerdo a la Sociedad Americana de Instrumentos (ISA) [16].

Nivel de corrosividad	Grosor de la capa de cobre corroída (nm)	Descripción del nivel de severidad
G1 Ligero	<30	La corrosión no pesa al determinar la confiabilidad.
G2 Moderado	30 a <100	Los efectos de corrosión son apreciables y pueden ser un factor para determinar la confiabilidad de un equipo.
G3 Violento	100 a <200	Hay alta probabilidad de que ocurra un ataque de corrosión. Se recomienda usar un control del medio o equipo diseñado y empacado especialmente.
G4 Severo	>200	Sólo puede operar el equipo especialmente diseñado y protegido. El uso de equipo en esta clase es un problema de negociación entre el usuario y el fabricante.

Si los gases en distintos ambientes corresponden a diferentes niveles de corrosión, entonces el nivel global está determinado por el gas que tiene el nivel más severo, esto se puede apreciar en la tabla 1.4 en la columna izquierda se tiene la designación para los niveles de corrosividad que van desde el G1 que es el menos agresivo hasta el G4 que es el más severo en agresividad y en la columna de la derecha las concentraciones de los gases corrosivos.

Tabla 1.4. Niveles de corrosividad y máximas concentraciones de gases corrosivos importantes de acuerdo a la clasificación ISA [16].

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

Es importante hacer notar que los resultados de investigaciones previas como es el caso de la norma ISA tienen utilidad al aplicarlo como una referencia para predecir los efectos que por corrosión se presentan en componentes electrónicos, sin embargo, quedan de manifiesto las limitaciones que se tienen al realizar pruebas de laboratorio y en este sentido se deberán desarrollar y perfeccionar continuamente los procedimientos de evaluación, hasta lograr cumplir con aspectos como: repetibilidad y estabilidad, y todo esto en lapsos cortos de tiempo. Los experimentos a realizar deberán establecer claramente cuales son los alcances y limitantes a los que se enfrentan los investigadores en este campo. Una vez que se han alcanzado las metas acerca de la fiabilidad del equipo para reproducir los efectos que por corrosión atmosférica se presentan en componentes de tarjetas electrónicas, será posible llegar a ponderar la capacidad del sistema utilizado para reproducir los efectos derivados de una exposición en ambientes naturales. En este sentido se pueden lograr grandes avances mediante una retroalimentación de un experimento a otro para que de esta forma aplicar medidas correctivas y preventivas a los subsecuentes experimentos.

De los resultados obtenidos en los experimentos se han de derivar razonamientos que involucren, medidas de protección para componentes, dispositivos y equipos electrónicos de una manera efectiva contra las fallas inducidas por corrosión. Las medidas protectoras se pueden agrupar en tres categorías:

- Selección de materiales y diseño de componentes.
- Medidas protectoras durante la manufactura, el transporte y el almacenamiento
- Medidas protectoras durante la instalación y en el servicio.

El análisis de las condiciones ambientales bajo las que estarán operando los diferentes equipos y componentes, es fundamental en las medidas de prevención. Los cambios predecibles del ambiente durante el ciclo de vida anticipado del equipo también deben juzgarse y ser tomados en cuenta. Una práctica recomendada es determinar la clase de corrosividad del ambiente antes y después de la instalación del equipo para confirmar que el ambiente tiene el nivel de corrosividad para el que se diseñó el equipo.

Por otra parte para cumplir con las exigencias de ensayos realistas que se asemejen a los fenómenos que se presentan en el ambiente natural, el equipo diseñado para pruebas de laboratorio deberá cumplir con las condiciones desde las menos agresivas hasta las que causan mayores efectos en cuanto a corrosión se refiere y realizar un seguimiento de los efectos que ocurrieron durante el periodo del ensayo con el análisis de los dispositivos previo al ensayo y posterior a éste.

Es de esperar que elementos o componentes que se encuentren expuestos a condiciones ambientales con una categoría de mayor corrosividad, el efecto sobre estos componentes es más evidente que al someterlos a condiciones menos agresivas. Sin embargo, es conveniente tener parámetros de decisión de acuerdo con el número de fallas producidas por uno y otra, ya que se pueden presentar daños ligeramente visibles que provocan fallas en la tarjeta electrónica y por otro lado puede presentarse deterioro visible por corrosión que no afecta al funcionamiento del sistema. Este tipo de fenómenos que se dan en el funcionamiento de los componentes de las tarjetas electrónicas será determinante en la decisión del ingeniero de diseño para seleccionar de los materiales idóneos bajo las condiciones que se han de predecir.

En la manufactura y posteriormente el ensamble de componentes electrónicos pueden aparecer problemas producto de la corrosión. Las superficies pueden contaminarse con relativa facilidad por el mismo personal cuando hay contacto entre las manos sin protección y los componentes o superficies de estos.

En la limpieza de los elementos que componen las tarjetas electrónicas se pueden tener residuos que aunado, a las especies contaminantes aerotransportadas al interior de la fábrica se presentan reacciones que afectan a los materiales utilizados y provocan la falla de componentes. Por esta razón es esencial la limpieza cuidadosa de los componentes y unidades ensambladas.

Durante el transporte, almacenamiento y la instalación de los componentes electrónicos se pueden presentar condiciones variables causando efectos mayores que durante las condiciones de servicio de manera que esto modificará de forma sensible la vida de servicio de los componentes y en la tarjeta en general. Es necesario tomar medidas preventivas que contribuyen a minimizar los efectos corrosivos sobre los elementos electrónicos; estas medidas consisten en cubiertas selladas herméticamente, inhibidores, etc.

Generalmente las medidas de protección utilizadas para el transporte consisten en elementos que brindan una protección mecánica, y en la mayoría de los casos se descuidan aspectos de hermeticidad entre los materiales utilizados como protectores, que evitan un impacto directo sobre los componentes que han de cubrir. Sin embargo, se tienen condiciones por falta de hermeticidad que pueden afectar de manera directa por las condiciones que se presentan durante el transporte y mayormente en el transporte marino donde las condiciones son mucho más severas.

Un análisis de las condiciones ambientales en interiores es una parte esencial en las medidas preventivas. Los cambios predecibles del ambiente durante el ciclo de vida del equipo también deben juzgarse y ser tomados en cuenta. Una práctica recomendada es determinar la clase de corrosividad del ambiente antes y después de la instalación del equipo para confirmar que el ambiente tiene el nivel de corrosividad para el que se diseñó. El período de medición debe incluir el tiempo más corrosivo del año, correspondiente a los meses más húmedos. Si el nivel de corrosividad del ambiente es G2, G3 ó G4, se debe analizar con mayor profundidad para determinar la razón de la alta corrosividad y buscar formas de mejorar la situación.

En ambientes de nivel G2, la confiabilidad y la vida de servicio de la electrónica están fuertemente influenciada por el diseño y por la selección de materiales y procesos de manufactura. En ambientes más corrosivos, como el G3 ó G4, es necesaria una protección por medio de una barrera como una carcasa protectora.

La susceptibilidad de las unidades ensambladas puede estar fuertemente influenciada por la elección de ciertos parámetros de diseño. La carcasa del equipo y el encapsulamiento de los componentes puede reducir los niveles de contaminantes y humedad reduciendo la convección y difusión del aire, y así el riesgo de corrosión. Los ventiladores usados para el enfriamiento pueden aumentar simultáneamente la velocidad de corrosión, porque la velocidad del aire incrementa la tasa de formación de depósitos de contaminantes y del polvo en los componentes. Un efecto adverso del encapsulamiento puede ser la liberación de vapores orgánicos corrosivos. La humedad condensada dentro de los encapsulamientos y carcasas pueden causar corrosión seria. Si se incrementa la temperatura interna a través del calentamiento, se reduce la humedad relativa y usualmente, la corrosividad. Los materiales que liberan sustancias corrosivas (tales como separadores de cartulina que contienen pequeñas cantidades de H₂S) deben evitarse en recintos o envases sellados o con una pobre ventilación.

Capítulo 2 Sistemas de Almacenamiento Magnético de Datos (SAMD)

2.1 Introducción

Los dispositivos de almacenamiento magnéticos (discos duros o flexibles), son utilizados, junto a las unidades de CD-ROM y unidades de DVD, como dispositivos de almacenamiento de datos secundarios. A diferencia de la memoria principal que es el medio de almacenamiento básico o primario, con la limitante que los datos permanecen en ella un tiempo limitado (hasta que se suspende el suministro de energía eléctrica), los discos duros son capaces de conservar una gran cantidad de información de manera permanente, o al menos mientras su estado físico sea óptimo, puesto que un mal uso o mantenimiento de los mismos, así como la acción de condiciones externas, pueden alterar su estado y producir cambios que resultan en una disminución de su rendimiento.

No obstante, a pesar de que los CDs y los discos duros tienen la misma finalidad, se distinguen en muchos aspectos tales como la tecnología para su manufactura, modo y capacidad de almacenamiento, tiempo de acceso y transferencia de la información, seguridad y mantenimiento de los datos, así como en el costo de fabricación.

Entre otras diferencias que presentan los discos duros y los CDs, desde el punto de vista de almacenamiento de la información es que mientras que en los discos magnéticos se efectúan a través de la acción de un campo magnético los procesos de lectura/escritura, en un CD esta es realizada por efecto de un rayo láser.

2.2 Características generales de discos magneticos

1. Un disco magnético (rígido o flexible) es un soporte de almacenamiento secundario, complemento auxiliar de la memoria principal o memoria RAM (memoria electrónica interna de capacidad limitada, mucho más rápida, pero volátil).
2. Capacidad para almacenar grandes cantidades de información en espacios reducidos con el consiguiente bajo costo por byte almacenado.
3. Es memoria “no volátil”, es decir, guarda la información aunque se retire el suministro de energía eléctrica.
4. Acceso directo a la información, es decir, accede más rápidamente al lugar donde se encuentran los datos a leer o escribir, sin necesidad de buscar los bloques de datos que le

preceden (como ocurría antiguamente con las cintas magnéticas). Los datos se guardan en archivos, a los que se acceden mediante su nombre.

5. Gran parte de los procesos (entrada/salida) tienen como origen los discos magnéticos, debido a:
 - i) La mayoría de los programas se almacenan en disco duro, constituyendo ejecutables.
 - ii) Para ejecutar los programas, se pasa de disco a memoria una copia de los archivos que necesitará el programa
 - iii) Sirven para simular “memoria virtual”, lo que permite una memoria mayor que la principal y por tanto ejecutar más procesos e incluso mayores a la capacidad de la memoria principal.
6. Dentro de los discos duros se distinguen entre los fijos, que se instalan por medio de una controladora de discos magnéticos; y los removibles, que pueden ser desmontados para su transporte.

Los discos duros se utilizan para registrar información masiva, programas y datos en computadoras personales, estaciones de trabajo, servidores, etc. Es el más utilizado debido a su gran capacidad, fiabilidad y velocidad de acceso a los datos.

Los discos duros se componen básicamente de la caja del sistema y su tarjeta controladora. Sus componentes son:

1. Unidad de discos (platos).
2. Material de soporte magnético.
3. Cabezal de lectura/escritura.
4. Motor de accionamiento de eje o de rotación de la unidad.
5. Motor de impulsos o de posicionamiento de los cabezales.
6. Tarjeta controladora.
7. Pistas, sectores, cilindro.

Los discos pueden estar constituidos por varios platos, es decir, varios discos con un espaciado entre ellos que permite el acceso de la cabeza de lectura/escritura, los elementos que proveen el espacio entre un disco y otro son cilindros metálicos con un diámetro que no afecta al desplazamiento de las cabezas como se ilustran en la figura 2.1, los platos se colocan sobre un eje central y una vez en posición efectúan el movimiento angular. Por lo general, suelen girar a una velocidad que oscila entre las 3600 y 7200 r.p.m.

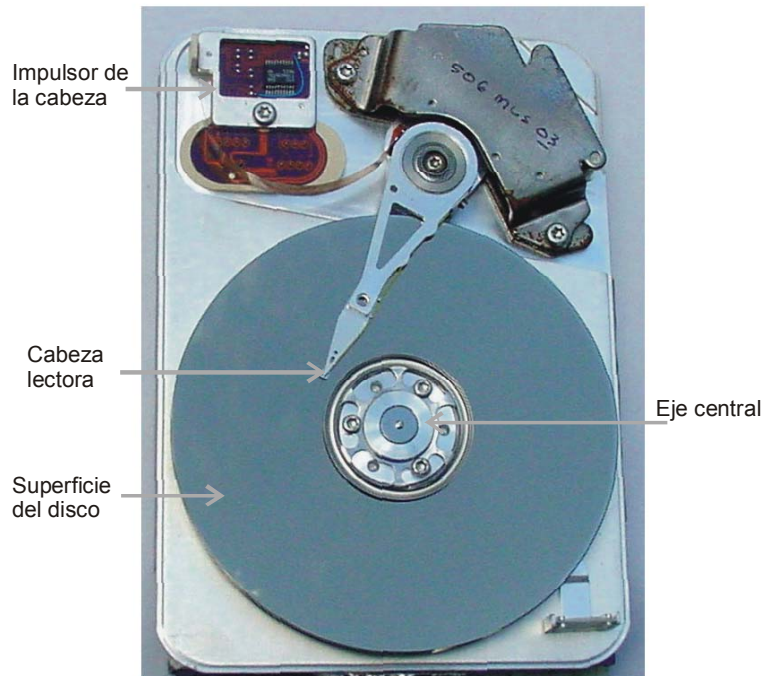


Figura. 2.1 Elementos que componen a un disco duro.

2.2.1 Material de soporte magnéticos

En un disco duro la estructura básica de las capas son aleaciones de aluminio, níquel fósforo, cromo-cobalto, carbono (AlMg/NiP/-Cr-Co/C) la capa magnética puede ser protegida con una película delgada que pueda brindar protección al desgaste y de la influencia del medio ambiente. La película protectora más usada para la protección de la capa magnética en discos duros es de carbono. Es necesario tener control pleno en la deposición de esta película protectora y obtener una capa uniforme sobre la superficie del disco.

Si bien es cierto que el colocar una película de carbono sobre la capa magnética tiene como fin proteger a ésta de los efectos del medio ambiente, sin embargo, se debe tener presente que la corrosión en los discos duros está latente al generarse una celda galvánica formada entre la película de carbono y la capa magnética. Aún cuando la diferencia de potencial entre éstas es baja, se pueden presentar condiciones que promueven la corrosión.

El deterioro en los discos duros se puede presentar en dos formas, la primera es por medios mecánicos entre los elementos que constituyen el disco, y una segunda por medios ambientales o incluso a través de una combinación de estos fenómenos. Cuando se presenta un daño en la superficie por medios mecánicos en estas pequeñas zonas dañadas las condiciones ambientales toman importancia para los procesos corrosivos, al generar una condición que influye en el deterioro de la superficie de los discos duros por efecto de la humedad depositada en la superficie del disco.

Una gran cantidad de los sustratos de los discos están hechos de una aleación Al-Mg 5086 (95.4% Al, 4% Mg y 0.15% Cr). Las dimensiones y tolerancias se encuentran permanentemente examinadas para mantener los valores dentro de los estándares permitidos para estos dispositivos.

Los materiales ferromagnéticos que se utilizan en la capa magnética son principalmente tres aleaciones basadas en cobalto: CoCrTa, CoPtCr y CoPtNi [17, 18]. La adición de cromo reduce la factibilidad de corrosión. Sin embargo, bajo las condiciones de operación de los discos duros en atmósferas diferentes es necesario proteger la capa magnética con una película que muestre estabilidad a las condiciones ambientales y al desgaste.

Generalmente los espesores de los discos se encuentran regulados bajo estrictos estándares, no así la dimensión del diámetro que es básicamente la que define sobre todo las dimensiones de la unidad de disco, el espesor es crítico para la capacidad volumétrica. Se han presentado casos en la industria en los cuales ha sido capaz de reducir el grueso del sustrato lo suficiente para incrementar el número de platos o discos con una altura de dispositivo dada.

Además de los discos duros el conjunto de dispositivos que lo componen son también susceptibles a sufrir deterioro por corrosión en el ambiente donde estarán operando.

2.2.2 Cabezal de lectura/escritura

El dispositivo de lectura/escritura se compone de varios cabezales que se disponen sobre los platos con gran precisión y a distancias pequeñas del orden de nanómetros. Las cabezas son las responsables de la lectura/escritura de los datos que se encuentran disponibles en los discos duros. La mayoría de discos duros incluyen una cabeza colocada en la parte superior y otra en la parte inferior de los platos, incluso pueden tener dos o más cabezas por superficie en procesadores grandes que permiten mayor capacidad de almacenamiento de datos, pensados para una actividad en particular, permitiendo con esto reducir la distancia de desplazamiento radial y disminuir el tiempo de búsqueda. Las cabezas no llegan a tocar la superficie de los discos, ya que debido a su gran velocidad de giro crean un colchón de aire sobre el que flotan, a distancias muy pequeñas, reduciendo así el desgaste y posibles daños mecánicos en el disco.

A través del tiempo los discos magnéticos han presentado importantes cambios en cuanto a capacidad de almacenamiento se refiere, esto principalmente durante la última década, lo anterior se da con el afán de incrementar la densidad de almacenamiento de datos a costos cada vez menores.

La densidad de almacenamiento es la cantidad de información almacenada por unidad de área y este es el resultado de constantes avances en las investigaciones sobre materiales y métodos de grabación de la información. Grabar grandes cantidades de información por centímetro cuadrado, reduciendo el tamaño del dispositivo y aumentando la capacidad son retos a los que se enfrentan continuamente las empresas destinadas a la manufactura de este tipo de productos.

Entre los años 1965 y 1993 la densidad de almacenamiento por unidad de área en los discos duros crecía a una razón de 45 % anual. Posteriormente la razón de crecimiento se incrementó al 65% en 1998. El crecimiento en la densidad se ha incrementado de nuevo en un sorprendente 100% por año a partir de 1998 al 2000. El incremento de la densidad de información por área requiere cambios tanto en las pistas como en los componentes principales de los discos. En el 2000 se contaba con una densidad de área en un rango de 10 a 15 Gbits /plg². con el continuo crecimiento de la densidad a una razón de 100% por año, hasta alcanzar la producción de 100 Gbits/plg² y superiores en la actualidad [19,20].

Estos incrementos en la densidad de almacenamiento que se han presentado en los discos duros en años recientes posee una relación directa con la reducción del espacio magnético. La película protectora sobre las cabezas y la distancia entre ésta y el disco, constituyen el espacio magnético como se muestra en la figura 2.2, uno de los cambios van en dirección hacia la reducción del espesor de las cubiertas protectoras de las cabezas entre otras modificaciones.

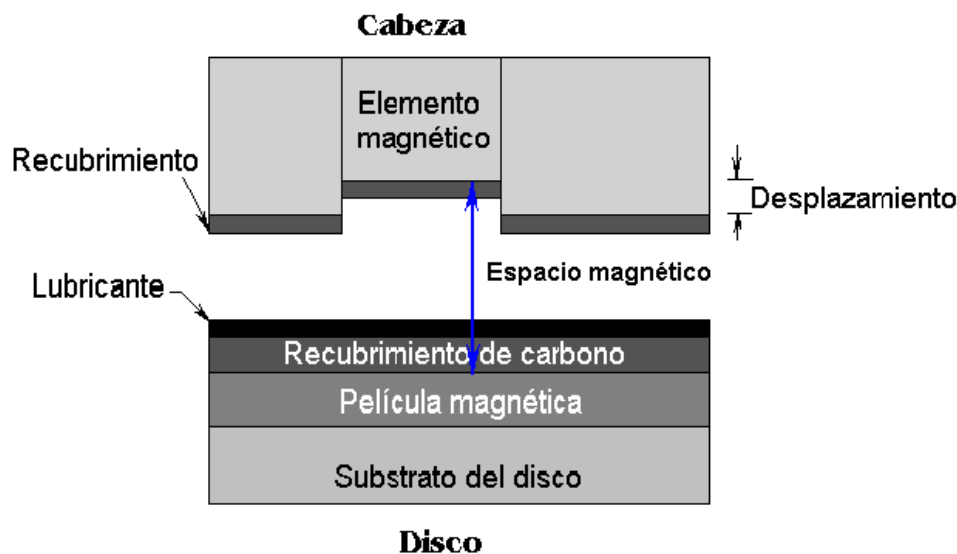


Figura. 2.2 Capas del disco duro y la cabeza de lectura

Tanto la cabeza de lectura/escritura como los platos (discos) poseen capas que brindan protección contra los factores ambientales presentes en los lugares donde se encuentran estos dispositivos. La función principal de la película de carbono que se encuentra sobre la capa magnética es mantener las propiedades de protección a la corrosión y al desgaste. Los estudios realizados por Peter R. Goglia et al [20] plantean que una deposición tradicional de cubiertas DLC (*Diamond-like carbon*) con haz directo de iones no tiene las propiedades protectoras requeridas en los discos duros a espesores por debajo de 30 Å. Es decir que será posible incrementar la densidad de almacenamiento de la información pero se verá afectada poniendo de manifiesto la reducida protección contra los procesos de corrosión y desgaste principalmente. En virtud de cumplir con las características de funcionalidad es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías y métodos más eficientes de deposición de las películas protectoras requeridas, con el fin de satisfacer las necesidades, manteniendo un incremento en la densidad de almacenamiento así como las propiedades protectoras a espesores de películas más delgadas.

Como ha sido mencionado el crecimiento en la densidad de área ha pasado de un histórico 45 a 60% a un 100% por año. La densidad de las pistas se ha acelerado más rápidamente que la densidad lineal al mantenerse más térmicamente estable la dimensión de la porción de celda. La dimensión de la banda del lector se ha minimizado a medida que crece la densidad de almacenamiento. El espacio entre cabeza y medio de almacenamiento de datos debe obtener un valor óptimo para alcanzar el objetivo de la densidad de grabado. La porción de celda y la miniaturización de cabezas de grabación requieren que todas las dimensiones que contribuyen para que el espacio del medio transductor sea reducido en proporción.

2.3 Influencia de la atmósfera en el deterioro de SAMD

La posibilidad de que un metal se corra en un medio ambiente dado, es una cuestión termodinámica. La corrosión galvánica ocurre en casos en donde diferentes metales están en contacto uno con otro tal como se presentan las capas de diferentes metales depositados en elementos como los discos duros.

Aunque el sistema mencionado (par de metales en contacto) se corroe, esto con base en conceptos termodinámicos, esto no proporciona información de la velocidad a la cual ocurre la corrosión. Debido a esto, es necesario llevar a efecto pruebas de laboratorio, las cuales contribuyen a determinar la cinética de corrosión.

La humedad del aire así como gases contaminantes presentes en el ambiente en donde se encuentran los discos duros promueven la generación de efectos que disminuyen la vida de servicio de estos. Las moléculas de agua pueden llegar hasta la capa magnética de los discos y provocar la disolución de iones metálicos, además del agua otros componentes de la atmósfera entre los cuales se encuentran gases corrosivos como el dióxido de azufre (SO_2) y el cloro (Cl_2) son los elementos que mayores daños ejercen sobre los discos duros y en menor intensidad los residuos de procesos químicos utilizados para construcción de componentes que intervienen en el ensamble de los discos duros (adhesivos, juntas, cojinetes, grasas, partes plásticas, etc.).

2.4 Mecanismos a través de los cuales se genera el deterioro de SAMD

Las películas de carbono han sido muy utilizadas en la industria manufacturera de discos duros, como recubrimiento sobre capas magnéticas para protegerlas de la corrosión y el desgaste. Recientemente se están utilizando varios tipos de carbono amorfo (a-C), así como carbono amorfo hidrogenado con o sin nitrógeno (a-C:H(N)), como una sola capa o en varias [21]. La incorporación de nitrógeno usualmente lleva a una reducción en los esfuerzos de la película interna y a mejorar la resistencia a la corrosión. Al mismo tiempo este tipo de estructura está acompañada por un incremento en la densidad de poros microscópicos y una superficie rugosa que supera los rangos permitidos ocasionando la aparición de efectos desfavorables en la funcionalidad de los discos.

La función principal de las cubiertas de carbono como capa protectora es una barrera entre el sustrato y el ambiente corrosivo. Las películas DCL, son conocidas por ser extremadamente inertes químicamente y por su alta resistividad eléctrica, éstas películas son un candidato potencial para ser usadas como cubiertas sobre superficies metálicas para evitar la corrosión.

La corrosión se inicia principalmente debido a sitios mal recubiertos por la película protectora, lo cual genera zonas en donde la composición de la capa magnética no es homogénea. Las propiedades del recubrimiento que son directamente influidas por la corrosión de las capas magnéticas son, porosidad, superficies demasiado rugosas y la conductividad electrónica. Los vacíos que se generan en la estructura del carbono amorfo así como también agujeros de dimensiones microscópicas en la matriz, son formados a través del mecanismo de crecimiento de películas, que son permeables al agua, a gases presentes en el medio ambiente y la disolución de iones metálicos. El espesor del recubrimiento de carbono depositado por métodos usados en la industria es alrededor de 8 nm como se puede apreciar en la figura 2.3. La tendencia actual es la reducción del espesor hasta niveles de 3-5 nm. Esto implica el desarrollo de películas protectoras de DCL con densidades de imperfecciones pequeñas usando otras técnicas de deposición de las capas protectoras.

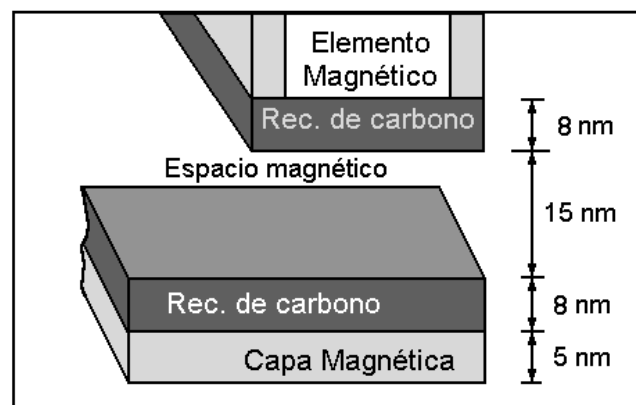


Figura. 2.3 Valores aproximados de los recubrimientos de los discos duros.

En la estructura de la película de carbono amorfo (a-C:H) se pueden presentar imperfecciones como diminutos poros de dimensiones aproximadas a 0.5 nm [21], se ha reportado que en presencia de estos defectos es posible que las moléculas de agua de dimensiones menores a este valor pueden traspasar fácilmente. Otros constituyentes atmosféricos que aceleran los daños en la estructura de la capa magnética de los discos duros son los gases contaminantes.

Los efectos de la corrosión sobre las capas magnéticas pueden ser medidos por diferentes técnicas, observando los cambios de las propiedades magnéticas microscópicamente, tal como: magnetización saturada (M_s), magnetización remanente (M_r), coecitividad (H_c); y la forma (M_r/M_s), midiendo los cambios en la resistencia eléctrica ($\Delta R/R_o$) para una estructura depositada sobre el sustrato o usando pruebas de métodos electroquímicos estándar.

La corrosión en los sitios visibles sobre el recubrimiento de carbono aparece alrededor de los poros. Un factor que resulta determinante es la rugosidad de la superficie. Un incremento en la rugosidad permite la retención capilar de vapor de agua en un medio ambiente húmedo. De tal forma que periodos largos de retención de agua conllevan a que el sitio sea más propenso al desarrollo de corrosión.

Las propiedades de las aleaciones para la protección contra la corrosión de las capas magnéticas que se encuentran cubiertas por una capa de carbono han sido estudiadas usando diferentes pruebas relativas a la evaluación de éstas y su relación con los procesos de corrosión.

En estudios realizados por B. Tomcik et al [22] concernientes a pruebas electroquímicas para determinar las propiedades protectoras contra la corrosión de la película de carbono sobre la capa magnética de discos duros, revelaron el desarrollo de productos de corrosión a lo largo de los valles de las líneas originadas por el proceso de texturizado sobre la superficies de los discos. La retención de vapor de agua por capilaridad a lo largo de los valles incrementan la creación de sitios de corrosión en los discos duros. En estas zonas se encontraron franjas particulares formadas por la migración de Co, hidroxidos, y compuestos de cloro sobre la superficie de carbono. También cabe destacar que se desprende del estudio que una baja solubilidad de Co decrece la corrosión sufrida en la capa magnética.

La estructura de las capas protectoras de carbono al presentar diminutos poros que permiten la penetración de vapor de agua y la disolución de Co de la capa magnética, esto a través de la migración de los iones Co, hacia la superficie de la película protectora por medio de una reacción electroquímica entre las aleaciones de Co y la capa de carbono. Sobre el recubrimiento de carbono emerge el Co como producto de corrosión. En algunos casos la corrosión de la capa magnética no presenta cambios macroscópicos en las propiedades de la película magnética, pero esos pequeños sitios de corrosión pueden producir defectos como ruido, o pérdida de información.

Los daños producidos por procesos de corrosión en los discos son tan pequeños que difícilmente se pueden apreciar a simple vista. Para identificar estos daños es necesario el apoyo de aparatos que brinden una buena resolución para observar los diminutos productos de corrosión presentes sobre las superficies de estos. Con el auxilio de microscopios electrónicos de barrido, microscopios de fuerza atómica etc., es posible determinar los elementos presentes en las zonas que han sufrido daño por corrosión. Así mismo es posible obtener imágenes que muestran la topología de las regiones afectadas. Obteniendo de esta forma información general acerca de los efectos producidos por corrosión.

2.5 Metodología para la determinación del efecto de la atmósfera en el deterioro de smad

Para la determinación de los niveles de deterioro de los discos por efectos corrosión se llevó acabo el siguiente procedimiento :

Primero se dividió la superficie de los discos duros en ocho partes tomando como referencia una marca que se colocó en la periferia. A partir de esta marca y siguiendo el sentido de giro de las

manecillas del reloj ,se colocó una plantilla que contenía ocho divisiones identificadas con un número romano, cada división iniciando con el “I” hasta el “VIII” como se puede observar en la figura 2.4, posteriormente se observaron los platos a bajos aumentos colocando la plantilla para la identificación de la zona inspeccionada y llevando un registro de las observaciones.

De esta forma se logra la identificación de superficies que pudieran ser tomadas en cuenta para su análisis en el microscopio electrónico de barrido. Una vez seleccionadas las muestras que serán observadas en este equipo se determinan de manera cuantitativa la cantidad de los elementos presentes en estas pequeñas zonas que muestran daño, para de esta forma determinar cuales son las condiciones que provocan deterioro en los discos duros.

Para el caso de los discos duros se han determinado que las regiones dañadas son de apenas unas cuantas micras o incluso hasta nanómetros, lo cual resulta difícil de observar a bajos aumentos. Sin embargo, el procedimiento de inspección se lleva a efecto con el fin de seguir una metodología que proporcione la mayor cantidad de información acerca de la magnitud del daño.

Otro punto importante de este estudio es determinar la densidad de esos pequeños puntos que presentan productos de corrosión, para así establecer una relación entre la densidad de puntos identificados por unidad de área y la funcionalidad del disco. Esto conlleva a establecer otra relación entre la densidad de poros permitidos por procesos de deposición de la película protectora de la capa magnética.

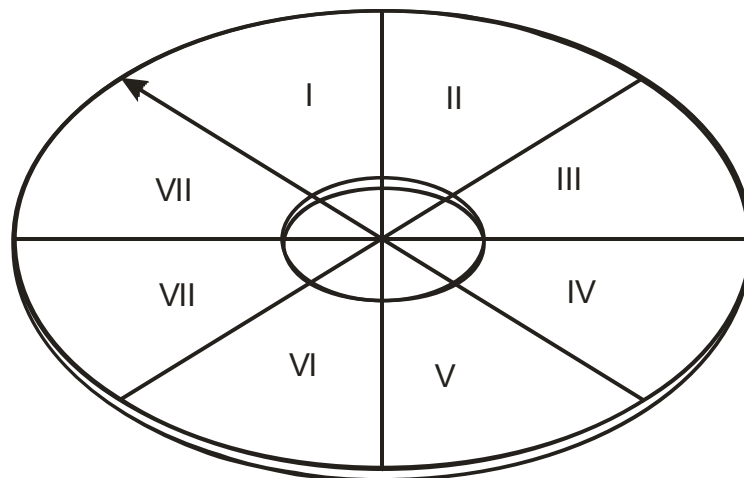


Figura. 2.4 Divisiones de los discos duros para la identificación de zonas con daño aparente.

Una vez que se seleccionaron las muestras para su observación en el microscopio electrónico de barrido, se identificaron los productos de corrosión sobre las superficies de las muestras.

El propósito principal de la realización de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica para la simulación acelerada del deterioro sufrido en discos de almacenamiento magnético de datos es la determinación de los efectos que tienen las variables ambientales en el deterioro de los discos.

Los procesos de degradación de materiales por condiciones atmosféricas pueden ser tomados como el resultado de la acción de todas las variables presentes en el ambiente. La velocidad con que los materiales se degradan se encuentra relacionada con las propiedades de los materiales.

Uno de los principales motivos para que las investigaciones sobre los mecanismos de degradación estén poco desarrollados se relaciona con el hecho de que los ensayos climáticos acelerados aún no permiten una simulación segura de los ambientes naturales. Debido a este hecho, los procesos de degradación acelerada solo permiten una aproximación a los daños que sufren los materiales en condiciones ambientales comunes. Sin duda, la mejor manera de reproducir los efectos que sufrirá un material bajo las condiciones presentes en un ambiente natural es exponerlo a este ambiente, esto representa varios inconvenientes razón por la cual se han desarrollado ensayos que simulan las condiciones presentes en diferentes ambientes.

Los materiales se deterioran por razones muy variadas por las condiciones ambientales que difieren en su concentración y tiempos de exposición a ciclos de temperatura y humedad relativa. Las condiciones ambientales determinan también los productos presentes en las superficies metálicas de los componentes que sufren deterioro por las condiciones ambientales. Es posible encontrar otros compuestos orgánicos además de los productos de corrosión sobre la superficie de los materiales.

Las cabezas y medios de comunicación usados en los procesos de grabación de disco duros son también susceptibles a sufrir corrosión por efectos atmosféricos vía corrosión galvánica y para protegerlos contra estos, se recubren con una película ultra delgada de carbono amorfo. Sin embargo, la corrosión ocurrirá si la película protectora presenta poros o discontinuidades.

Los defectos en la película protectora se deben a varios factores como el método de deposición utilizado, la preparación de las superficies, etc. de tal forma que una deposición pobre de la película provocará daños prematuros en los discos duros. Así mismo se debe tener presente que una exposición de los sistemas de almacenamiento de datos como los elementos electrónicos que lo constituyen, al permanecer en ambientes agresivos (valores de temperatura y humedad elevados así como gases corrosivos) dañan no solo a las superficies magnéticas sino también a los componentes electrónicos con una mayor rapidez.

Los resultados reportados de pruebas de laboratorio en discos duros [23,24] indican que el deterioro vía pila de corrosión galvánica bimetálica, se presenta bajo condiciones de humedad relativa menores que en los casos de corrosión de equipo eléctrico-electrónico, en los que se tienen valores considerados como críticos por arriba 70% de humedad relativa.

Capítulo 3 Funcionamiento de la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica (CAPACA)

3.1 Antecedentes de la cámara de pruebas aceleradas de corrosión

Para llevar a efecto las pruebas de corrosión atmosféricas de manera acelerada para simular de una forma realista las condiciones a las que se encuentran expuestos los componentes micro y macro electrónicos además de otros componentes como los discos duros, se requiere un sistema de pruebas de naturaleza específica [27,28, 29]. El equipo destinado para tal fin es capaz de reproducir ambientes típicos de zonas que se consideran como críticas de acuerdo a las condiciones presentes (agresividad del ambiente). La cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica (CAPACA) fue diseñada y construida en el grupo de trabajo de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales (UDIATEM). Actualmente se encuentra en funcionamiento y en proceso de mejora continua, incluyendo la adaptación de nuevos sistemas que contribuyen a obtener un mejor control de las variables que intervienen en los experimentos y por consiguiente una mejor simulación de los efectos que se generan en los componentes que estarán expuestos en los ambientes creados en ésta.

El equipo CAPACA es capaz de reproducir los efectos que el ambiente ejerce en componentes electrónicos de manera rápida y a un bajo costo. El diseño de CAPACA enfocado principalmente al área de la electrónica ha mostrado resultados interesantes en sus primeras etapas realizando ensayos a tarjetas de teléfono de uso residencial y obteniendo los mapas de corrosión correspondientes. Con las pruebas desarrolladas es posible tener un estimado del daño causado a los componentes electrónicos que bajo condiciones controladas de prueba manifiestan fallas. La repetición de los experimentos que simulan los fenómenos que ocurren durante los procesos corrosivos llevarán a generar modelos matemáticos que se adapten a estos. Lo anterior está encaminado a determinar de manera rápida los modos de fallas bajo condiciones críticas de operación.

Se tienen antecedentes de equipo utilizado para realizar pruebas de corrosión acelerada con un enfoque diferente, de tal forma que las condiciones y parámetros que se manejan no están enfocadas a la clase de dispositivos y materiales comúnmente utilizados en la manufactura de dispositivos electrónicos y de discos de almacenamiento magnético de datos. Además de tener condiciones de prueba diferentes a las que comúnmente se encuentran expuestos, es decir, no son pruebas que se puedan correlacionar con exposiciones ambientales reales.

Es por tal razón que se diseñó y construyó una cámara para pruebas aceleradas de corrosión atmosférica. Se desarrolló de manera conjunta entre la UDIATEM y la empresa ALCATEL-Indetel. La idea que guió el proyecto fue desarrollar un procedimiento que corresponda con las condiciones de servicio para componentes electrónicos que se encuentran en servicio en

ambientes tipo de la República Mexicana. Los dispositivos a analizar, presentan diferencias que van desde el tamaño, la geometría de la tarjeta, así como en los materiales utilizados para su manufactura, además de tomar en cuenta los estudios reportados en la literatura acerca de las condiciones de ensayo y los procedimientos llevados a efecto para determinar la velocidad de corrosión de diferentes materiales utilizados en equipos eléctrico-electrónicos [30]. También se tiene presente que las condiciones de servicio en países desarrollados son diferentes a México, por lo que es necesario determinar la problemática y comportamiento para las condiciones climatológicas de México, por lo que es necesario desarrollar experimentos que correspondan a condiciones particulares y apropiadas para los elementos que se encuentren a prueba. Por otro lado, el equipo utilizado para realizar las pruebas de corrosión aceleradas permite modificar las condiciones de ensayo de manera fácil y rápida para reproducir ambientes manipulando las concentraciones de los contaminantes para simular diferentes atmósferas. Los dispositivos en condiciones normales de servicio se encuentran en ambientales iguales, pero los efectos del ambiente sobre éstos se hacen notar a diferentes periodos de exposición. Lo anterior obedece en gran parte a las propiedades de los materiales utilizados para la construcción de los dispositivos electrónicos, como es el caso de los discos de almacenamiento magnético de datos, así como los elementos de la estructura que brindan rigidez y permiten la manipulación de componentes en conjunto como son las carcasas en el caso de las computadoras y otros equipos que contienen dispositivos electrónicos.

3.2 Descripción de CAPACA

En la figura 3.1 se muestra la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosféricas (CAPACA). En este equipo se han realizado diversas pruebas a tarjetas telefónicas. Un punto importante es que los ambientes generados para las pruebas no solo afectan a los especímenes de prueba sino también a los componentes que constituyen a CAPACA. Es posible realizar un estimado del daño que por efectos del ambiente generado se presentan en estos y documentarlos para análisis comparativos posteriores.

También es posible construir un mapa de corrosión para los componentes de CAPACA donde se presenten daños considerables, que permitan identificar puntos críticos que durante el transcurso de las pruebas se hacen evidentes, y de esta manera proponer las mejoras necesarias para este equipo.



Figura 3.1 Cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica (CAPACA)

En el proceso para la evaluación de componentes de tarjetas electrónicas es necesario establecer las reglas y procedimientos para la selección de los parámetros ambientales que permitan realizar los experimentos de manera idéntica además de documentarlos asignando un código para cada ensayo, de que se puedan tener puntos de comparación en condiciones iguales de exposición entre los componentes expuestos.

Se deberá realizar la identificación de las tarjetas o componentes a ensayar basandose básicamente en:

- Dimensiones de la tarjeta
- Densidad de componentes electrónicos
- Modelo

Así pues se tienen elementos particulares que permiten agruparlos en familias con el fin de facilitar el procedimiento de análisis.

El tipo de ensayo se clasificará de acuerdo a los contaminantes característicos de cada ambiente de acuerdo con la clasificación ISO.

En la literatura se reportan con gran frecuencia cinco contaminantes para los cuales se tienen normas de calidad bien establecidas [31,32]. Estos son: dióxido de azufre, monóxido de carbono, ozono, óxidos de nitrógeno, partículas suspendidas totales, e hidrocarburos. En cuanto al monitoreo de estos, se tienen ciertas limitantes, en lo que se refiere al equipo necesario para la determinación de todos los contaminantes involucrados en este tipo de pruebas.

Por tal razón es conveniente hacer notar que en la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica que es presentada en este trabajo se ha limitado al uso de tres de los principales

contaminantes que se encuentran en la atmósfera: dióxido de azufre, ozono, y oxido de nitrógeno, contando además con humedad y la posibilidad de controlar la temperatura.

Durante el desarrollo de los ensayos se lleva un registro de las condiciones presentes en cada una de las pruebas, esto con el fin de llevar un control en el tiempo de los parámetros y condiciones así como verificarlas durante los ciclos.

Las pruebas se deberán realizar de manera continua, esto para evitar la intervención de otros mecanismos de deterioro. En la figura 3.2 se presenta el diagrama básico de operación de la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica.

Los tres elementos básicos que constituyen el equipo CAPACA se muestran en la figura 3.2, que son una computadora, un microcontrolador (tarjeta controladora) y la cámara donde se encuentran elementos como los actuadores además de sensores de humedad y temperatura, así mismo se cuenta con elementos instalados y programación que admitirán una fácil adición de detectores de gases. Con esto se pretende llevar un mejor control en las concentraciones de los contaminantes.

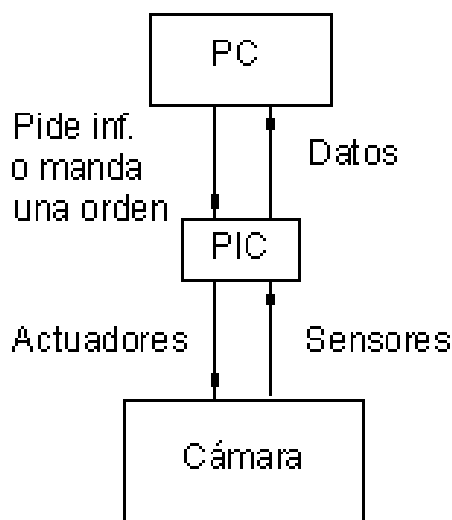


Figura.3.2 Flujo de información entre los componentes básicos de CAPACA.

La computadora cumple varias funciones, entre las que se encuentran, mantener una comunicación permanente con la tarjeta controladora a través de una comunicación serial que envía la información de las condiciones presentes en la cámara y ésta es almacenada para su análisis posterior.

3.3 Descripción de la programación de los ensayos.

La programación de los experimentos se realiza desde la computadora a través de una interfase gráfica, ésta permite al usuario preparar de manera fácil y rápida las condiciones a simular durante un experimento o prueba a realizar. Como se puede observar en la figura 3.3 se tienen los elementos como son: sensores y actuadores además de otros parámetros de prueba que se configuran de manera amigable.

Los actuadores son los elementos que modifican de manera directa las condiciones en el interior de la cámara estos son: el generador de ozono, el humidificador, la bomba de calor y las electroválvulas, los sensores solamente registran las condiciones interiores y envían la información al PIC y éste a su vez a la computadora. Los tiempos de lectura o la frecuencia con que el sensor está muestreando los valores de temperatura y humedad relativa en la cámara se recopilan en una base de datos para dar un formato normalizado y visualizar los datos almacenados de manera gráfica. El tiempo de muestreo abarca rangos muy amplios que incluyen frecuencias que van de segundo a segundo y de así requerirlo la prueba se pueden lograr ampliar estos tiempos hasta valores de cada 30 minutos, estos valores son también manipulados desde la misma interfase gráfica que se muestra en la figura 3.3.

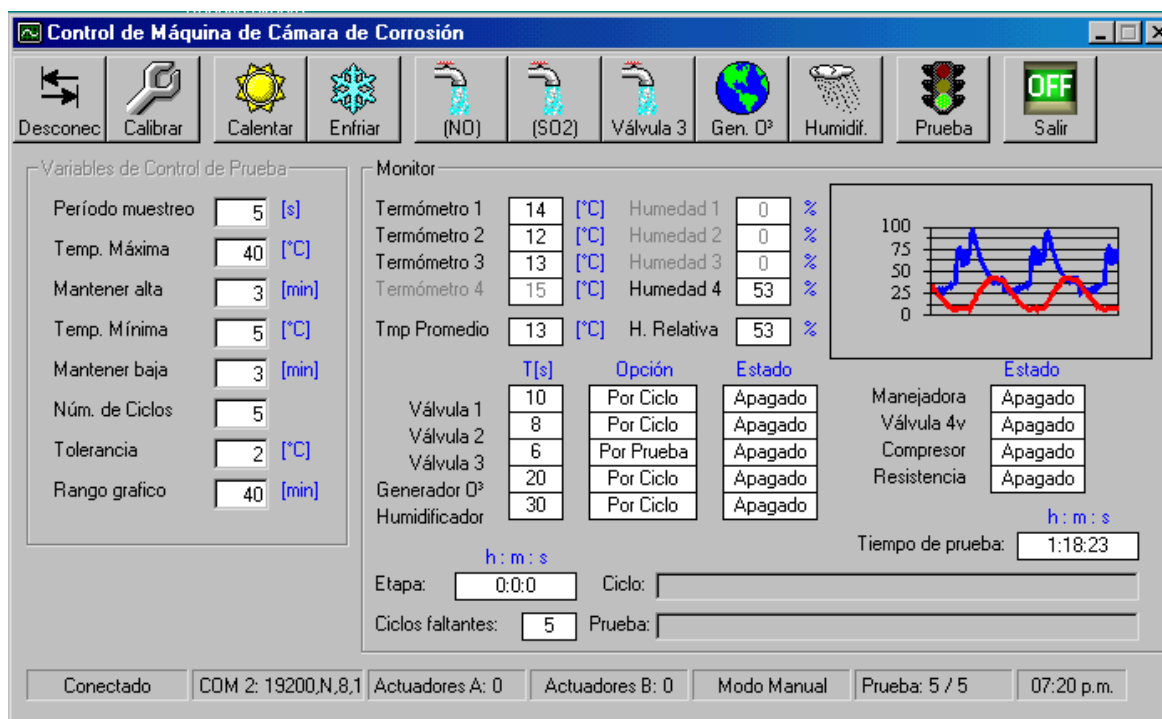


Figura 3.3 Interfase gráfica del sistema de control de ciclos

De la figura 3.3 destacan varias zonas importantes en la pantalla de control, en la parte superior se encuentra la barra de botones o iconos, en la parte inferior la barra de estado, en la parte izquierda la zona de la programación de ciclos, en la parte central la zona de sensores y actuadores, en la parte superior derecha la visualización gráfica de los ciclos de manera continua.

En la zona de programación de ciclos se encuentra en primer lugar la etiqueta de **periodo de muestreo** y frente a cada etiqueta se localiza una **caja o espacio** donde se coloca para este caso el tiempo en segundos en que se llevará a efecto la recepción de los datos para su almacenamiento en la computadora y la visualización de manera gráfica.

En segundo lugar se encuentra la etiqueta de **temperatura máxima** en la caja frente a ésta se coloca el valor de la temperatura en grados Celsius que para el ciclo se tiene contemplada y que justifique el ambiente a simular. En el caso de la figura 3.3 este valor se muestra como 40.

La etiqueta siguiente en orden descendente es **mantener alta** en la caja correspondiente se debe colocar el tiempo en minutos que la temperatura permanecerá constante (dentro del rango permisible por la tolerancia) los valores que puede tomar esta caja es de 1 a 15 minutos dependiendo del diseño de los ciclos.

En el mismo orden la etiqueta que corresponde es **temperatura mínima** y en la caja frente a esta se coloca el valor de la temperatura inferior del ciclo igualmente en grados Celsius y para el ejemplo de la figura 3.3 es de 5.

Descendiendo un nivel se encuentra la etiqueta de **mantener baja** en este caso se sigue de manera semejante lo mencionado en mantener alta, solo para este caso la temperatura se mantiene constante en el valor mínimo especificado en el punto anterior.

Para el caso de la etiqueta **número de ciclos** en el espacio correspondiente se debe indicar el número de ciclos con número entero dependiendo el tiempo que requiera la prueba diseñada y el tipo de especímenes que serán expuestos a ambientes corrosivos.

La siguiente etiqueta **tolerancia** indica el valor en grados Celsius, que le es permitido variar a la temperatura por razones de protección a la bomba de calor, ya que si no se indica un valor de tolerancia ésta, permanecería activando y apagando en cuestión de segundos provocando daños por mecanismos diferentes a los comunes bajo condiciones normales de operación.

En cuanto a la etiqueta **rango gráfico** en este caso se indica el valor en proporción a los números de ciclos para su visualización en la zona de gráficos.

Así mismo la barra de estado incluye compartimentos con información como:

- En el primer compartimiento de izquierda a derecha muestra el estado de la tarjeta controladora que puede ser conectado o no conectado esto indica si existe o no comunicación entre la tarjeta y la computadora.
- El segundo compartimiento muestra información del puerto y la velocidad de comunicación. Para la figura 3.3 se muestra el puerto 2 (COM2) y una velocidad de 19200 (kbs) además de información del PIC.
- El tercer y cuarto compartimiento despliega información del estado de los actuadores.

- El quinto compartimiento muestra el estado de operación de la máquina, que pueden ser tres:
 - Operación en modo manual
 - Operación por tiempo
 - Operación por temperatura
- En el sexto compartimiento se despliega información del estado de avance de los ciclos hasta que estos concluyen.
- En el último compartimiento aparece el cronómetro que está en sincronía con el reloj de la computadora y este a su vez con el cronómetro programa que contabiliza el tiempo real transcurrido de prueba. En el programa se tienen dos cronómetros una lleva el registro del tiempo total de prueba y el otro el registro por ciclo transcurrido.
- En la parte central superior se muestra la información en tiempo real que se deriva de los sensores de temperatura y de humedad relativa. Para el monitoreo de la temperatura y la humedad relativa se han distribuido igual número de sensores para el monitoreo de temperatura y la humedad relativa. Como los sensores están dispuestos en posiciones diferentes en la cámara es posible que se presenten variaciones del orden de 1 grado y en ocasiones puede llegar a 2 entre una posición y otra. Sin embargo, pensando en que esta condición se podía presentar se consideró en la programación realizar un promedio de los valores registrados, este valor es el límite superior o inferior de acuerdo a lo programado como valor mínimo y máximo.
- En la posición inferior de la misma parte central se despliega el estado de las electroválvulas (inicialmente cerradas) que son la vía por donde se añaden los gases ya que durante el transcurso de una prueba éstas se accionan por tiempo, de acuerdo al flujo que requiera la atmósfera a simular. En esta misma zona se encuentra la información de estado para el generador de ozono, así como para el humidificador, además las electroválvulas cuentan con una variante más que es la posibilidad de accionarlos por ciclo o por prueba.

Lo anterior obedece a que existen diferencias en la concentración de gases contaminantes de los ambientes naturales, siendo posible simularlos de manera sencilla. Los ambientes que se pueden simular pueden ser urbanos, industriales, rurales y marinos, así como combinaciones entre estos, que forman ambientes más agresivos que de manera individual lo cual acelera los procesos corrosivos para los componentes electrónicos y materiales expuestos a estos ambientes.

Por tal razón que se han dispuesto variantes como las que se muestran en la interfase gráfica figura 3.4, que permitan añadir las concentraciones requeridas para cada caso en particular. La descripción mencionada muestra la flexibilidad y facilidad que se tiene en la programación de los ciclos.

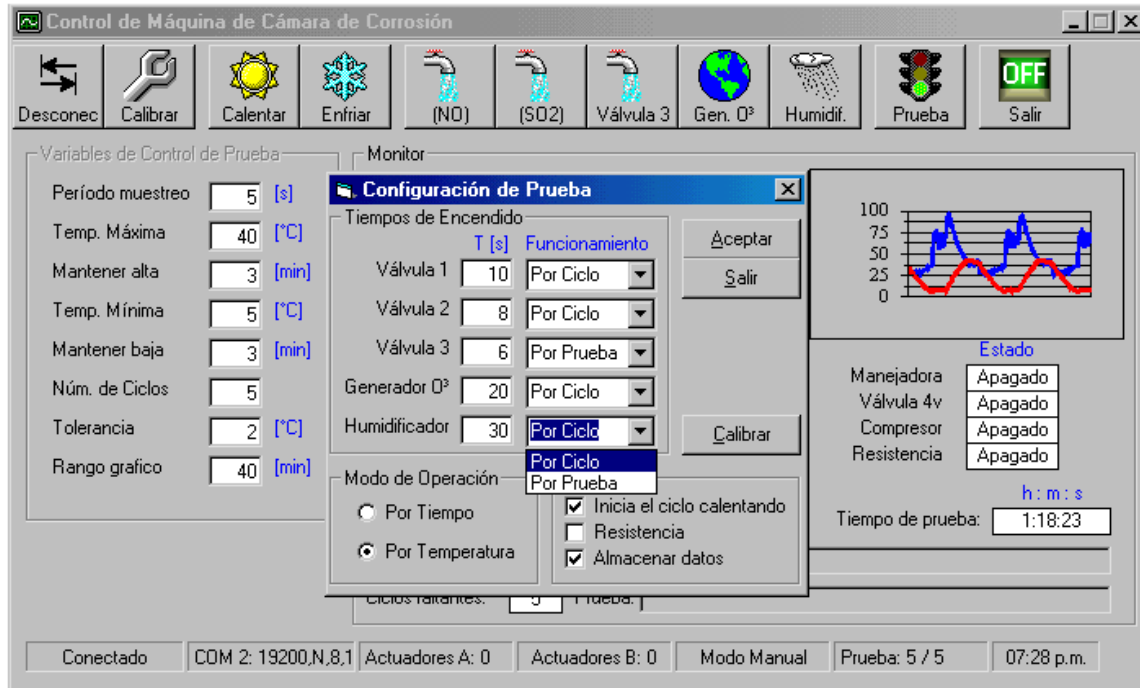


Figura 3.4 Interfase gráfica del sistema de control de ciclos

En la figura 3.4 tiene el botón marcado como *calibrar* dando lugar a una ventana para ingresar los valores de apertura de las válvulas y el tiempo de funcionamiento de el generador de ozono así como el humidificador. Además se puede elegir la manera de inicio de ciclo, esto es inicia a partir de la temperatura ambiente incrementándola o disminuyéndola según se quiera.

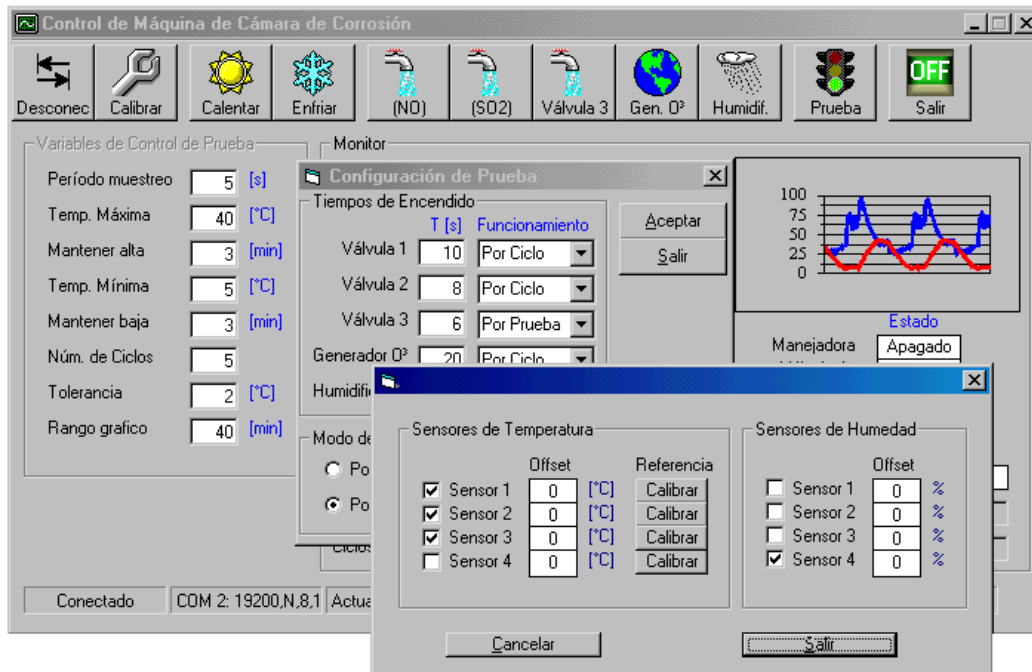


Figura 3.5 Interfase gráfica del sistema de control de ciclos

Adicionalmente si el botón calibrar de la figura 3.5 se presiona se muestra una ventana para dar de alta los sensores de temperatura y los de humedad relativa. Cabe mencionar que se ha prevenido en el hardware así como en el software el manejo de cuatro sensores para la temperatura y la humedad relativa como se ha mencionado con anterioridad. Así pues, si el software detecta que solo un sensor está conectado en la tarjeta el valor predeterminado para este caso es de cero (0). De igual forma, si se conoce de antemano el número de sensores ya sea de humedad o temperatura y se marca la casilla respectiva.

Tomando en cuenta la agresividad de los ambientes que se generan en la cámara se ha considerado que estos afectan también a los sensores de humedad y temperatura instalados en el interior de la cámara, por ser dispositivos electrónicos. Sin embargo, estos son protegidos cuidando que no se afecten las propiedades de los sensores, con la finalidad de mantener condiciones reales de prueba y a su vez incrementar la vida en servicio, que bajo estas condiciones de agresividad se reduce considerablemente. La vida de un sensor es de aproximadamente 400 horas bajo las condiciones de trabajo mencionadas anteriormente.

3.4 Procedimiento para la puesta en marcha de CAPACA

Para la puesta en marcha de CAPACA es necesario seguir un procedimiento con el fin de evitar daños por picos de voltaje en las tarjetas controladoras de tal forma que se garantice el funcionamiento correcto del equipo. Para esto se debe seguir con los siguientes pasos:

- ❖ Se deben energizar en el siguiente orden la bomba de calor, a una línea independiente del resto de los sistemas.
- ❖ La computadora
- ❖ Se debe verificar que el regulador de voltaje que energiza a la tarjeta controladora se encuentre en estado energizado. Esta tarjeta debe contar con un led centinela que indica si la tarjeta fue energizada o no.
- ❖ Verificar que los manómetros de los gases se encuentren con la presión a la cual se pretenden inyectar los gases de acuerdo con los cálculos previos.
- ❖ Una vez que se ha cumplido con lo mencionado en los puntos anteriores estableciendo las condiciones idóneas para la prueba, se procede al encendido de la computadora y la activación del programa ejecutable que gobernará los ciclos.

- ❖ En la computadora destinada al almacenamiento de los datos derivados de las pruebas se mostrará una pantalla que contiene los siguientes elementos:
 - Muestra los dispositivos que se han de controlar a través del microcontrolador, que cuenta con tres opciones de operación, la primera es: control manual de todos los elementos mostrados en la pantalla a través del ratón de la computadora, la segunda control automático o control por temperatura esto es: los actuadores, son controlados por medio de la información que envían los sensores de temperatura al microcontrolador, la tercer forma de operar la cámara es un control por tiempo, esto significa que se puede asignar un valor en minutos para que la bomba de calor mantenga los periodos de enfriamiento y

calentamiento así como mantenga la temperatura constante hasta completar los ciclos programados.

- Antes de activar los ciclos de manera manual o automática, primeramente se deberá encender el humidificador hasta lograr elevar la humedad relativa (X%HR) de acuerdo con los datos requeridos para la simulación. Una vez obtenido este valor de humedad, se procederá a la puesta en marcha de los ciclos.
- Un ciclo de experimento consta de elevar la temperatura hasta alcanzar el valor de T_1 , este valor se mantiene constante durante un lapso de tiempo (t), y posteriormente se disminuirá la temperatura hasta T_2 de igual forma se mantendrá constante durante el mismo lapso de tiempo (t) y con esto se concluye el ciclo.
- En la tabla 3.1 se muestran los valores de las variables humedad y temperatura así como sus tiempos en que alcanzan estos valores en un ciclo y en las figuras () se representa gráficamente.

Tabla 3.1 Muestra los valores de las variables y los tiempos en que éstas alcanzan.

Variable	Estado	
	Calentamiento	Enfriamiento
Temperatura °C	$T_1=45\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$	$T_2=5\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$
Humedad relativa (%)	$30 \pm 1\text{ \%}$	$90 \pm 1\text{ \%}$
Tiempo para cada evento	50 %	50 %
(Relativa al tiempo total de un ciclo)	10 minutos	10 minutos

En la figura 3.6 se puede observar la gráfica ideal de temperatura y humedad contra tiempo, se puede notar que cuando la temperatura llegue a su valor máximo la humedad relativa se encuentra en el mínimo y viceversa. En la figura 3.7 se presentan las concentraciones de diferentes gases contaminantes simulando una atmósfera en particular. Este patrón debe ser repetitivo durante la prueba, para garantizar que las condiciones sean iguales.

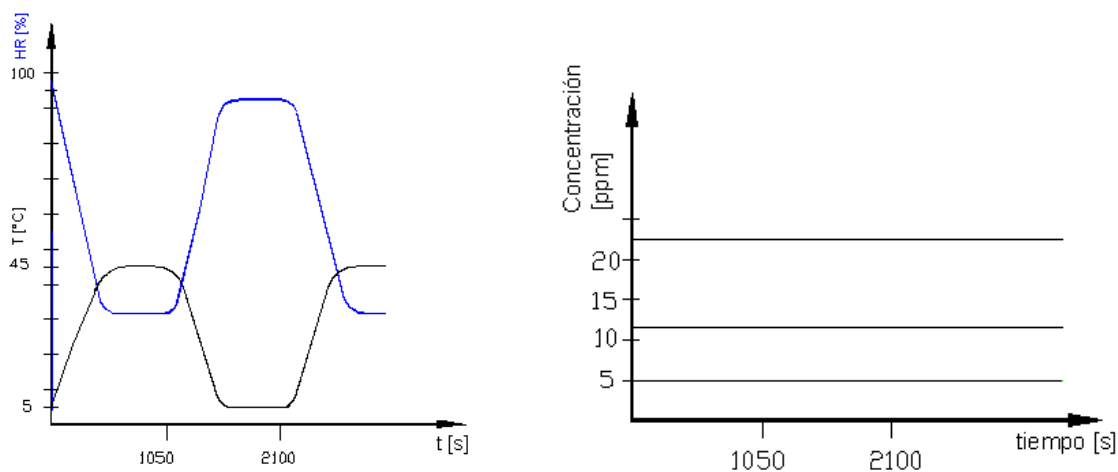


Figura. 3.6 Gráfica ideal de la humedad relativa y temperatura tiempo.

Figura. 3.7. Gráfica ideal de las concentraciones de gases que permanecen constantes durante la prueba.

T_1 = Temperatura máxima

T_2 = Temperatura mínima

T = Temperatura constante

La validación de las pruebas aceleradas de corrosión atmosférica consistió en reproducir los efectos que de manera natural se presentan en los macrocomponentes electrónicos bajo condiciones normales de operación, para llevar a efecto estas pruebas primero se tomaron muestras de campo y se aplicó el procedimiento de inspección descrito en el punto 4.3, se documentaron los resultados incluyendo imágenes y análisis químico, esto se realizó de manera puntual en las muestras que presentaban daño por corrosión que si bien es cierto con este análisis no es posible determinar la fase presente (que sería lo ideal) se puede realizar un comparativo de los elementos en una zona localizada donde se realizó el análisis químico.

3.5 Operación automática de CAPACA

Se deben establecer primeramente los siguientes parámetros:

- El número de ciclos que se desea realizar [números enteros]
- Los rangos de temperatura a los cuales se estará trabajando (máximo (T_1) y mínimo (T_2)) en [°C].
- Los tiempos de estabilización de la temperatura (t) en [min].
- El tiempo que se mantendrán activadas las válvulas permitiendo el flujo de gas al interior de la cámara en [seg]
- El tiempo que se mantendrá activado el generador de ozono sea por ciclo o prueba.
- El tiempo que se mantendrá activado el humidificador en [s] o existe la posibilidad de ser controlado por niveles de humedad relativa a través de sensores.

Una vez que se han completado estos datos en los márgenes correspondientes, mostrados en la pantalla del programa se presiona el botón marcado con la etiqueta de *prueba*, de esta manera se tendrá control automático de los ciclos a través del por el microcontrolador PIC.

Al inicio de un ciclo se deberán activar a la vez los siguientes elementos:

- Generador de ozono (O_3)
- Electroválvula de óxido nitroso (NO)
- Electroválvula de dióxido de azufre (SO_2)
- Bomba de calor
- Manejadora de aire que homogenizará la atmósfera de la cámara.
- humidificador

El ciclo se iniciará aumentando la temperatura del ambiente a T_1 , y una vez que se ha logrado alcanzar ésta, se mantiene durante un lapso de tiempo (t), e inmediatamente se inicia el periodo de enfriamiento hasta lograr la temperatura T_2 . De igual manera se mantiene esta temperatura durante el mismo tiempo (t) y se continua con el periodo de calentamiento hasta concluir con el número de ciclos preestablecidos.

El equipo de pruebas CAPACA es capaz de operar con una variedad de elementos de medición que se pueden acoplar a la tarjeta controladora y de esta forma realizar pruebas múltiples, es decir la cámara no solo está destinada a ensayos en los cuales se utilice equipo electrónico sino que se pueden implementar ensayos enfocados a la evaluación del deterioro en materiales de ingeniería.

Finalmente la flexibilidad que muestra la programación permite al operador cambiar los parámetros de manera rápida, esto implica que los tiempos de calibración así como de puesta en marcha se realizan en lapsos cortos, efectuando modificaciones mínimas al programa.

La calibración de CAPACA se ha logrado a través de los equipos de medición que hasta el momento lo integran una tarjeta de control y sensores, los sensores que se encuentran instalados hasta ahora son de humedad relativa y temperatura, quedando pendiente la adición de sensores de gases, hasta ahora los gases se añaden a través de electroválvulas que regulan el flujo volumétrico desde un microcontrolador. Los sensores de humedad al igual que los de temperatura traducen una señal analógica a digital, reciben una diferencia de potencial y despliega un valor en la pantalla de la computadora, la relación entre la variación de voltaje y la humedad relativa es lineal, lo que facilita la calibración de los sensores. Para la calibración de los sensores de humedad se utilizó un sensor de humedad relativa electrodigital este se colocó en el interior de la cámara, hasta hacer coincidir con el sensor instalado en la cámara y variando la resistencia en un principio este proceso se hacía de manera manual, en la última versión del programa se hace desde la interfase gráfica, haciendo más fácil el proceso de calibración de los sensores este proceso se ha incluido en la programación del microcontrolador.

Para la calibración de las atmósferas se tomaron como base los diferentes niveles de corrosividad y máximas concentraciones de gases corrosivos de acuerdo a la clasificación ISA. Por otra parte, para llevar un control más preciso de las concentraciones de los gases se requiere la instalación de sensores que midan con exactitud las concentraciones en el tiempo, con esto se lograría una retroalimentación con el microcontrolador que de manera automática regula los tiempos de apertura de las válvulas para mantener concentraciones constantes durante el tiempo de la prueba, sin los sensores de gases la cámara tiene limitaciones para mantener las concentraciones de los gases constantes, sin embargo los resultados de las pruebas experimentales han permitido simular de manera confiable las pruebas aceleradas de corrosión atmosférica de acuerdo con las pruebas realizadas.

Capítulo 4 Componentes electrónicos y procedimientos de prueba

4.1. Descripción de los microcomponentes electrónicos

Los circuitos integrados (microcomponentes) son dispositivos de diminutas dimensiones constituido por millones de transistores. Éstos funcionan como interruptores encargados de controlar el flujo de corriente dentro del microcomponente haciendo posible la manipulación de información por medio de un código binario.

Aunque el principio que ha llevado a la creación del circuito de silicio es muy antiguo, el descubrimiento del efecto transistor por Schockley, Bardeen y Brattain marcó un punto decisivo en la evolución de la electrónica. A partir de entonces, todos los tubos de vacío (bulbos), de aparatos electrónicos basados en efectos termoiónicos pudieron ser sustituidos por dispositivos mucho más pequeños.

Las técnicas posteriores utilizadas por Jean Hoerni permitieron realizar, mediante un conjunto de pasos simples, todos los componentes de un circuito y sus interconexiones sobre un fragmento de silicio permitiendo así avances significativos. Un año más tarde Robert N. Noyce usó esta técnica para crear el primer circuito integrado.

Desde la aparición del primer circuito integrado, año tras año; se han realizado mejoras a los proceso de fabricación. Las nuevas tecnologías han hecho necesaria la disminución del espacio físico ocupado por los circuitos integrados, por lo que los fabricantes están desarrollando cada vez con mayor ímpetu, un mayor número de dispositivos electrónicos por unidad de área.

Los avances en la manufactura de circuitos integrados, basada principalmente en la miniaturización de los circuitos ha permitido el incremento en sus propiedades, lo anterior aunado a la fuerte reducción de costos, estos avances han sido evidentes en las últimas décadas. Además existe una notoria evolución en un futuro inmediato que llevará a circuitos con características de flujo de información muy superiores a los grandes sistemas existentes y que permitirán aplicaciones múltiples. En la figura 4.1 se muestra como la miniaturización ha tomado lugar a través de los años.

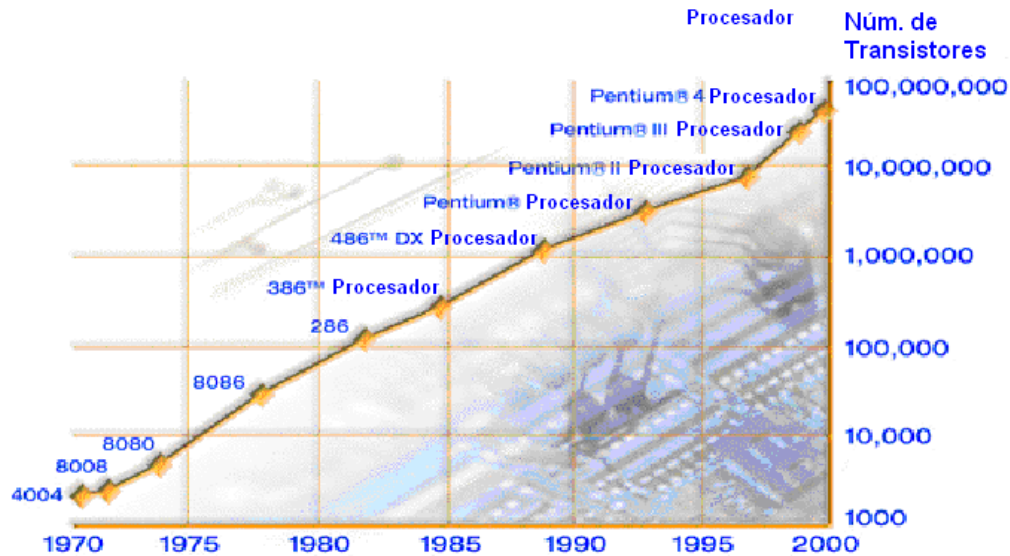


Figura 4.1. Miniaturización de los circuitos integrados según la ley de Moore

Normalmente los circuitos integrados (IC), son construidos a escalas reducidas, en el rango de fracciones de micras. Estas dimensiones minúsculas aplicadas a su manufactura son el mayor problema debido a que evidentemente esto facilita el daño de los microcomponentes por efectos de corrosión y otras causas.

Es de esperarse un incremento en las fallas que por corrosión afectan a los circuitos integrados porque a medida que ocurre la miniaturización de las componentes internos se favorece que los efectos por corrosión sean de mayor magnitud en los elementos o partes fundamentales de los circuitos integrados.

4.1.1 Descripción de los métodos de manufactura de los circuitos integrados

En la manufactura de microcomponentes, como son los circuitos integrados, se utilizan métodos como puede ser la manufactura en una superficie con la técnica de micromaquinado, incluyendo la deposición de películas delgadas de diferentes materiales y el uso de capas de sacrificio. Para su construcción, es necesaria la combinación de múltiples capas de material sobre un substrato, esto se puede apreciar en la figura 4.2.

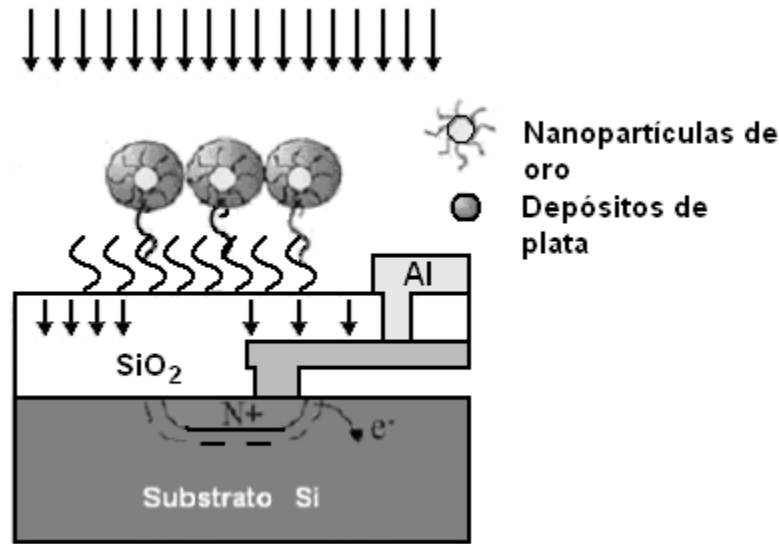


Figura 4.2 Materiales utilizados en la manufactura de circuitos integrados

En la figura 4.2 se puede apreciar la configuración de materiales típicos que forman parte de los circuitos integrados así como las capas delgadas de recubrimientos que son aplicadas a estos materiales para protegerlos contra los procesos de corrosión producidos por el ambiente donde se encuentran. Sin embargo, una mala aplicación de las capas de recubrimientos, como pueden ser falta de homogeneidad de las capas o poros de tamaños microscópicos, pueden causar serios problemas en ambientes con altas concentraciones de contaminantes así como humedades relativas mayores al 40%.

4.1.2 Problemática del encapsulado de CI

Para lograr un mejor rendimiento de los circuitos integrados, estos son encapsulados en resinas poliméricas y con materiales cerámicos. Los nuevos materiales cerámicos poseen una serie de propiedades que los hacen superiores en muchos sentidos a los materiales poliméricos. Las propiedades de los materiales cerámicos que marcan la diferencia son: gran dureza, resistencia a la abrasión, resistencia en ambientes corrosivos, y en aplicaciones donde se manejan altas temperaturas. Para circuitos en donde se requiere garantizar la hermeticidad se utilizan el encapsulado cerámico; sin embargo, ello va aunado a un incremento en el costo.

El encapsulado es una cuestión fundamental en el diseño y fabricación de microdispositivos. En el caso concreto de los microsensores o circuitos integrados, resulta improductivo fabricar un transductor eficaz si posteriormente el encapsulado no le proporciona un aislamiento hermético del entorno. El tipo de encapsulado depende también de requisitos de la interfase (necesidad de ser manipulados manualmente, integración en otra estructura de mayor tamaño, etc).

La importancia del encapsulado es tal que, de ser posible, debe ser incluido en las herramientas de diseño CAD del dispositivo. Pese a la gran diferencia de técnicas y materiales implicados en la

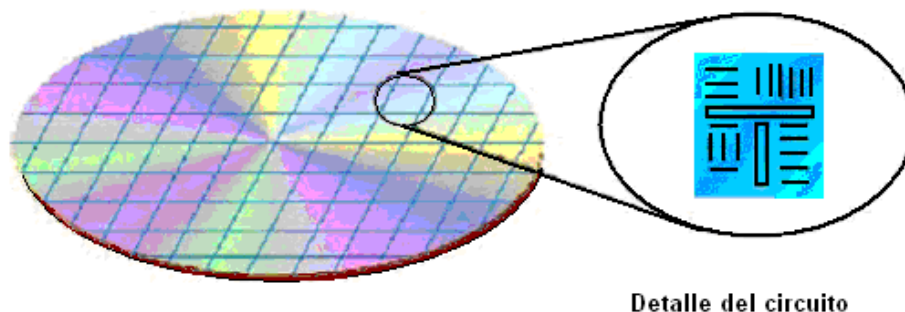
fabricación del microsistema o microcomponentes propiamente dicho y en su encapsulado, dicha integración posibilitaría el diseño del *microsistema* conforme a su encapsulado [29]. Todo lo mencionado con antelación conllevaría importantes ventajas.

La determinación del tipo de encapsulado es una de las primeras consideraciones que deben abordarse a la hora de diseñar un microsistema, ya que debe cumplir los requisitos previos de tamaño e interfase con el entorno, y además supone una parte considerable del costo final del sistema (hasta un 70%). El motivo de dicho costo tan elevado es que en el encapsulado intervienen numerosos procesos, algunos de ellos bastante costosos, incluyendo no solo los costos del encapsulado en sí, sino también los asociados a los procesos de prueba necesarios.

Las funciones originales del encapsulado en los circuitos integrados se sujetaban a redistribución de las señales, soporte mecánico, distribución de potencia y aspectos térmicos. Sin embargo, en los microsistemas actuales el encapsulado debe, además, proteger de la temperatura, humedad, interferencias electromagnéticas o luz; entre muchos otros efectos. Al mismo tiempo, debe permitir también la accesibilidad al mismo para realizar medidas de control de calidad y calibración. La dificultad que ello representa es un obstáculo importante especialmente para la fabricación y comercialización de microsistemas químicos y biológicos.

Los procesos empleados en el encapsulado son: unión de las secciones de los discos delgados sobre los cuales se ha realizado el marcado (delimitado superficial de los discos para dividir los diferentes circuitos), y encapsulado en una cubierta protectora. Los procesos de prueba incluyen pruebas de permeabilidad e integridad eléctrica, entre otras. Estas pruebas son muy complejas y costosas, especialmente para dispositivos que han de trabajar en ambientes agresivos, y en aquellos cuyas pruebas pueden incluir parámetros mecánicos o químicos.

En procesos de manufactura de circuitos integrados primeramente se realiza el marcado o se delimitan secciones en un disco delgado donde se imprime el circuito previamente diseñado, cada circuito es impreso por un elemento diferente como se puede apreciar en la figura 4.3.



Disco marcado con el circuito

Figura 4.3 Disco delgado donde se realiza el marcado de las pistas de los circuitos integrados.

En la manufactura de los circuitos integrados se tienen tres etapas principales que se muestran a continuación en la figura 4.4.

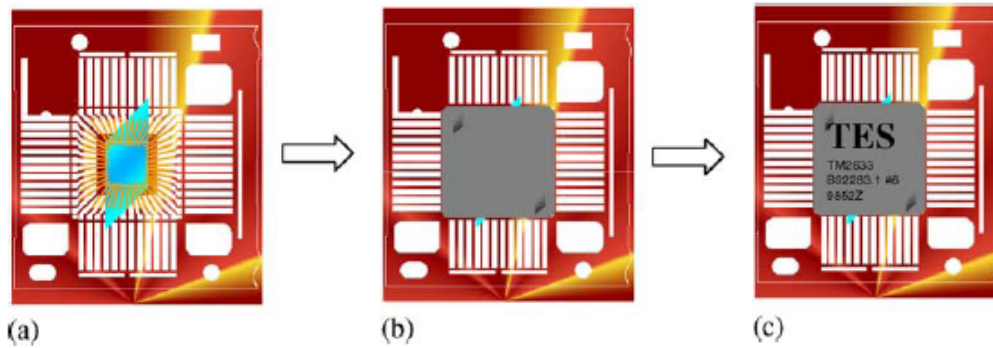


Figura. 4.4 Proceso de encapsulado de los microcircuitos, a) circuito impreso. b) encapsulado del circuito c) marcado del polímero y pruebas.

4.1.3 Pruebas de corrosión a circuitos electrónicos

Las investigaciones realizadas en el campo de la corrosión en equipo electrónico [33,34] han llevado a desarrollar ensayos que permitan cubrir plenamente con los requerimientos que en este caso los dispositivos electrónicos demandan, para ello se realiza una propuesta de ensayos que se enriquecerá de manera continua mediante retroalimentación con el avance de los ensayos, de esta manera se logra un perfeccionamiento de los ensayos, estos se han realizado en ambientes naturales en exteriores e interiores, para el caso de sistemas y componentes electrónicos.

De las pruebas reportadas en la literatura se concluye que :

- Niveles bajos en concentraciones de gases contaminantes como SO_2 , CO_2 , NO , O_3 , en combinación con la humedad producen reacciones que derivan en corrosión y afectan en el rendimiento de los sistemas electrónicos.
- Estos límites de las concentraciones de gas para el inicio de los procesos de corrosión son moderados y no pasa del orden de ppb.
- Concentraciones superiores a los límites representan un deterioro acelerado de los componentes, esto dependerá en gran parte de los materiales utilizados en la manufactura así como de los tiempos de exposición en combinación con las concentraciones de los gases contaminantes.

Algunos autores que han llevado a efecto investigaciones en componentes electrónicos engloban este tipo de pruebas en dos categorías para su estudio [35,36]:

Pruebas de laboratorio: incluyen estudios para el desarrollo de nuevos materiales para la manufactura de componentes y sistemas electrónicos resistentes a las condiciones agresivas de ambientes severos a través de simulaciones realistas de los efectos ambientales.

Pruebas de campo: Incluye la disposición de los dispositivos y clasificación de los ambientes en donde operan los componentes electrónicos.

Los datos relativos a pruebas aceleradas de corrosión atmosférica hasta ahora presentados han demostrado que ninguna prueba de laboratorio ha podido simular los efectos de los diversos ambientes naturales encontrados en el mundo. Sin embargo, se han realizado diversos ensayos obteniendo avances en esta dirección. El incremento en los problemas promovido por medio ambiente, es una de las principales líneas de investigación que pretende determinar, de manera rápida y a un bajo costo, los posibles efectos del medio ambiente sobre los materiales utilizados en la manufactura de micro componentes electrónicos .

Los ambientes que han sido simulados para realizar pruebas de corrosión aceleradas a circuitos electrónicos incluyen gases contaminantes de manera individual o combinación de estos, de esta manera se pueden incluir ciclos de temperatura y humedad de modo que las pruebas sean apegadas a un ambiente real, de tal forma que los procedimientos utilizados en pruebas con mezcla de gases están siendo rutinariamente utilizados en este tipo de estudios que involucran:

- ❖ Cálculo preciso de la mezcla utilizada en los experimentos para la simulación acelerada de los procesos de corrosión de manera realista.
- ❖ Control exacto del equipo y verificación de las condiciones de prueba.

Las pruebas de corrosión atmosféricas son utilizadas para determinar la fiabilidad de los equipos electrónicos, debido a la observación de fenómenos intermitentes que afectan en la operación de estos en ambientes variados. En los últimos años son cada vez más comunes estos efectos en los equipos electrónicos y se ha puesto particular énfasis en la solución de los aspectos mencionados con anterioridad.

4.2.- Procedimiento de prueba e inspección

Este procedimiento está enfocado a la experimentación con micro y macro dispositivos electrónicos expuestos a las pruebas. Las muestras son seleccionadas meticulosamente con el fin de evitar confusiones entre componentes de la misma familia. Para ello se lleva un registro de los especímenes a través de imágenes que conforman una base de datos, que proporcionan la información característica de cada uno de ellos.

Los especímenes son limpiados con aire comprimido para eliminar las partículas que se presenten sobre la superficie de estos. Posteriormente se toman imágenes antes de llevar a efecto los experimentos, y a continuación son colocados en la posición que ocuparán en la cámara de pruebas. La manipulación de las muestras se realiza con protección en las manos (guantes de latex) que evitan que las muestras sean contaminadas con grasa de los dedos y así evitar los puntos localizados que promueven la corrosión por otros mecanismos.

4.2.1 Preparación de las muestras

Para este experimento se utilizan como elementos de prueba discos duros y tarjetas de teléfonos de uso doméstico con la finalidad de reproducir los fenómenos de deterioro que ocurren sobre éstas en condiciones ambientales.

- Se asigna un código para los teléfonos y otro para los discos duros para llevar un seguimiento en cuanto a la evolución de los micro y macro componentes que se encuentran en las tarjetas de los discos, así como de los teléfonos y se analizan componentes con características similares bajo condiciones de prueba iguales.
- Se definen las condiciones a las que se someten los componentes así como el periodo de duración de la prueba.
- Los especímenes para la prueba deben ser de características similares
- Se debe documentar la información particular de los especímenes a ensayar como: modelo, fecha de manufactura, lote, número de serie, años de servicio aproximado etc,
- Los especímenes de prueba son componentes de discos duros y tarjetas electrónicas, estos se eligieron por la facilidad de disposición y una rápida comparación respecto a los efectos producidos por el medio ambiente, además de otras características favorables como las dimensiones que estos poseen.

4.2.2 Exposición de los dispositivos a condiciones atmosféricas

- Los elementos de prueba se exponen para reproducir los efectos causados por el medio ambiente sobre micro y macro componentes, bajo condiciones específicas y periodos variados de exposición.
- Se debe realizar la comparación de los efectos que el medio ambiente sobre componentes iguales, condiciones y periodos de exposición también iguales.
- Los periodos de exposición de los elementos se establecen en 100 horas como un mínimo para esta clase de componentes. Otros periodos pueden ser considerados periodos cortos pueden ser necesarios en aquellos componentes que presentan corrosión severa y periodos prolongados donde la corrosión es menos evidente.
- La disposición de los dispositivos a ensayar se muestra en la figura 4.5, está enfocado básicamente a discos duros y aparatos telefónicos de uso residencial. Sin embargo, se ha considerado tener variantes para otro tipo de dispositivos. Los especímenes de prueba pueden ser montados fácilmente en una estructura de manera que se aproveche en lo posible el espacio de la cámara. El material de la estructura debe ser seleccionado de

acuerdo a las condiciones que prevalecen dentro de la cámara, para este caso se seleccionó acrílico y PVC.

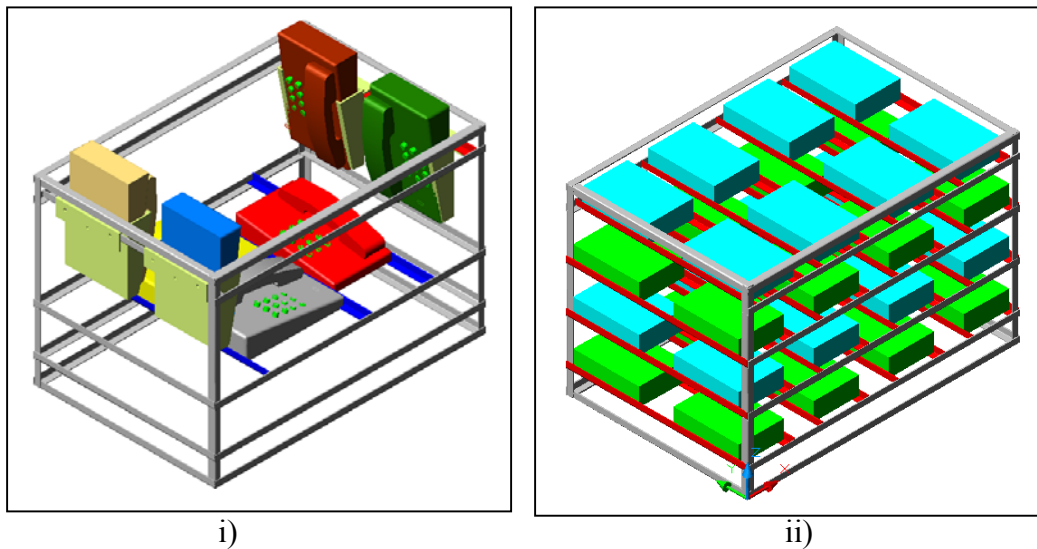


Figura. 4.5 Disposición de los especímenes de prueba i) aparatos telefónicos ii) discos duros

- Los especímenes pueden ser colocados en una de las plataformas colocadas en diferentes niveles, en este caso se considera que las condiciones son homogéneas en toda la cámara, en virtud que el volumen de control es relativamente pequeño (aproximadamente 1 m^3).

4.2.3 Consideraciones para la evaluación de los especímenes de prueba

Una vez que ha concluido el periodo de exposición, los componentes son analizados para determinar el grado de deterioro sufrido por efectos de corrosión. Es necesario documentar las observaciones así como apoyarse con imágenes que muestran la apariencia de los componentes.

Posterior al retiro de los especímenes de la cámara deben ser cuidadosamente secados para eliminar la humedad que permanece sobre la superficie, esto antes de realizar el diagnóstico posterior y compararlo con el diagnóstico previo a la exposición además de su observación a bajos aumentos en el estereomacroscopio.

Los factores atmosféricos tienen un seguimiento continuo durante el periodo de la prueba dependiendo de las necesidades individuales se registra la frecuencia con que se realiza el monitoreo de estos, de acuerdo principalmente al tipo de prueba y especímenes a ensayar. Los requerimientos de prueba deben especificar todos estos aspectos del monitoreo de las variables presentes y su frecuencia.

Es importante hacer notar que las variaciones de los factores atmosféricos están ligadas a los procesos de corrosión, así que cuantificar esas variaciones pueden proporcionar datos importantes sobre la resistencia a la corrosión de los elementos de prueba. Los factores ambientales tienen variaciones día con día, de tal manera que los datos reportados de los factores atmosféricos son valores promedio y con esta base se designan los ambientes que se han de reproducir.

En virtud de tratarse de un ensayo con características particulares, y considerando que su función es la de validar los resultados obtenidos en campo mediante métodos de análisis teóricos y métodos experimentales, éste se efectuará con el fin de desarrollar metodologías de ensayo que se adapten a diferentes componentes y materiales. En este sentido pretender generar modelos matemático que correspondan con el deterioro observado en micro y macro componentes electrónicos es demasiado ambicioso. Por tal razón se propone un procedimiento que permita establecer una relación entre las condiciones presentes, los tiempos de exposición y los componentes a ensayar dando como resultado una serie de investigaciones dirigidas a estos componentes en particular.

De los métodos seguidos para ensayos de pruebas de corrosión en laboratorio así como las diferentes clasificaciones de los ambientes que engloban a todos estos en cuatro categorías generales para facilitar el estudio, que incluyen concentraciones de contaminantes y tiempos de exposición de los materiales etc.

Para el caso de tarjetas electrónicas y dispositivos de almacenamiento magnético de datos es necesario establecer los procedimientos que permitan evaluar los niveles de deterioro presentes en los componentes expuestos a atmósferas corrosivas, para de esta manera, desarrollar una clasificación de los ambientes que generan deterioro en los discos duros y componentes electrónicos que con frecuencia suelen ser diferentes a las que provocan daño en microcircuitos o pistas impresas, a pesar de encontrarse en condiciones similares comúnmente. El experimento permitirá obtener información valiosa acerca de la frecuencia con que aparecen los daños en los dispositivos utilizados a través de los ensayos, así como niveles de deterioro para diferentes componentes.

Una vez seleccionadas las muestras se efectuará el ensayo manteniendo la congruencia entre los parámetros especificados en cada uno de los ambientes a reproducir y duración del ensayo, manteniendo las variación en las concentraciones dentro de rangos permisibles en el transcurso de las pruebas, evitando las variaciones súbitas en las condiciones ya que esto repercutirá en la rapidez con que actúen los agentes corrosivos. Así que las condiciones de prueba deben ser homogéneas con base a las especificaciones planteadas.

Las pruebas de laboratorio tienen como principal objetivo realizar experimentos de manera acelerada, de tal forma que se reduzcan los tiempos así como costos para la evaluación del equipo.

En las pruebas de laboratorio los componentes son expuestos a condiciones cíclicas tanto de humedad, como temperatura, así como concentraciones elevadas de gases dosificados, vía electro-válvulas, a la cámara de pruebas y controladas de manera automática por un microcontrolador. Una vez que se tienen presentes los gases contaminantes más representativos en la atmósfera o agentes corrosivos más comunes en ésta, se inician los periodos de

experimentación. Realizar pruebas con concentraciones de gases a diferentes niveles de concentración, permite simular las condiciones ambientales naturales a las que están expuestas las tarjetas electrónicas durante un periodo específico de un día cualquiera.

Para este caso se considera importante hacer notar que el estudio se ha limitado exclusivamente a la acción de los gases corrosivos más representativos en los procesos de corrosión atmosférica, como son : SO_2 , NO_x , y el O_3 , despreciando los efectos de otros gases cuyo efecto en la velocidad de corrosión es menos representativo [36].

En este caso el estudio está limitado a la utilización de gases contaminantes sin contemplar los efectos de las partículas suspendidas en el aire. Sin embargo, se ha considerado agregar cada vez más elementos que contribuyan a una simulación cada vez más apegada a los efectos corrosivos derivados de la atmósfera.

4.2.4 Desarrollo de las pruebas

1. La probeta se coloca de tal manera que el flujo de aire; así como los gases corrosivos que se inyectan; no incidan en forma directa sobre las superficies de las muestras, esto aún cuando la velocidad del aire es baja. Se debe garantizar que no exista contacto entre las tarjetas o con cualquier otro elemento para evitar así posibles pares galvánicos. Por otra parte, para evitar su contacto es necesario colocar separadores de material inerte a las condiciones de ensayo.
2. Los gases se dosifican hasta lograr concentraciones que permitan generar las condiciones adecuadas para iniciar la prueba preestablecida. La selección de los tiempos de humectación se hará tomando como guía lo establecido en la clasificación de las normas ISO 9223:1992 teniendo presente que estos pueden llegar a tomar valores diferentes, pero procurando condiciones constantes en el interior del la cámara de durante el periodo de tiempo que se requiera para el ensayo.
3. Para mantener condiciones constantes de prueba, se debe cumplir con varios aspectos, primeramente garantizar la hermeticidad de la cámara, así como calibrar previamente los elementos de medición (sensores) los cuales deben ser inspeccionados y recalibrados durante los pasos programados. Con base en lo anterior se pueda lograr la repetibilidad, así como la estabilidad en los ensayos programados. Los intervalos para la verificación o muestreo de la concentración de gases corrosivos en la cámara son de 30 minutos. Una vez que se ha muestreado la concentración de los gases se debe añadir la cantidad correspondiente de ser esto necesario. Los gases que se inyectan a la cámara estarán dirigidos hacia la parte inferior como se observa en la figura 4.6, para evitar la incidencia directa en las muestras a ensayar.
4. Se suministra la humedad a la cámara a través de un humidificador comercial, tal como se muestra en la figura 4.7, capaz de elevar la humedad relativa hasta valores del 95% aproximadamente. Este valor en la humedad es suficiente para generar una película de condensado sobre la superficie de las muestras y lograr las condiciones propicias para que de manera acelerada se inicie el proceso de corrosión.



Figura 4.6 Se muestra la parte posterior de la cámara de corrosión donde se encuentran las tarjetas y se pueden apreciar las electro-válvulas que permiten la entrada de los gases.



Figura 4.7 Se muestra la ubicación del humidificador, que proporciona la humedad a través de un ducto de la cámara de corrosión.

5. La temperatura en el interior de la cámara es muestreada a través de sensores de temperatura del tipo cerámicos o similares, adecuados para funcionar en ambientes corrosivos y a temperaturas elevadas que garanticen un funcionamiento continuo durante las pruebas programadas aunque es de esperar que la vida de servicio de estos componentes se ve disminuida por la agresividad del ambiente.

6. La temperatura y humedad se medirán en tiempo real. Los valores de temperatura y humedad deberán ser tomadas en lapsos de 60 segundos para ambas durante el transcurso de la prueba, tiempo suficiente para que se establezca una atmósfera homogénea en la cámara y evitar variaciones que promuevan un valor de error mayor.
7. La secuencia de la aplicación de los gases contaminantes y agentes corrosivos señalados en el punto 8, se lleva a cabo al inicio del primer ciclo y posteriormente cada vez que los sensores indiquen una concentración diferente a la programada y necesaria para efectuar el experimento deseado.
8. La calibración de los elementos de medición de gases contaminantes se realizará con periodicidad de acuerdo al tipo de sensores utilizados y a las especificaciones de diseño de estos.
9. Se definirán de acuerdo a los estándares ya mencionados las condiciones de prueba para cada atmósfera que se desee simular como son: rural, marina, urbana e industrial, así como la posibilidad de implementar combinaciones de atmósferas entre éstas.

4.3 Metodología para la determinación del deterioro de equipo y dispositivos electrónicos

La metodología seguida para la inspección de los componentes sometidos a pruebas atmosféricas de corrosión aceleradas tiene su base en la de análisis de tarjetas electrónicas de teléfonos de uso residencial [36,27], dando lugar a un análisis completo acerca del deterioro sufrido de los micro y macro componentes.

Con base en la metodología seguida es posible definir diferentes grados de deterioro en los componentes, así como documentar el progreso de los efectos del ambiente sobre los componentes y, de esta manera, realizar mapas de deterioro para los discos de almacenamiento magnético de datos de la misma manera que se realizaron para tarjetas telefónicas.

Para las tarjetas de teléfonos de uso residencial se plantea un proceso de inspección para determinar los daños sufridos por efectos de la corrosión atmosférica figuras 4.7 y 4.8. Este proceso se presenta en los diagramas de flujo.

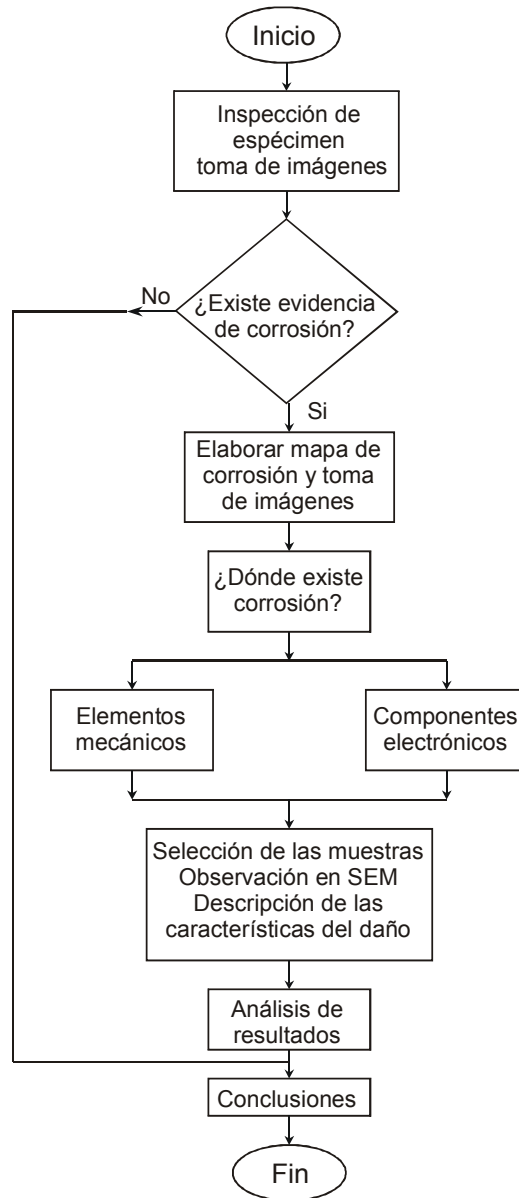


Figura.4.7 Diagrama de flujo para la inspección de los especímenes obtenidos de campo

Los procedimientos para la inspección de los especímenes de campo y aquellos considerados como nuevos (sin uso) difieren en algunos aspectos por consideraciones de exposición, sin embargo se espera que los resultados sean comparativos cualitativamente.

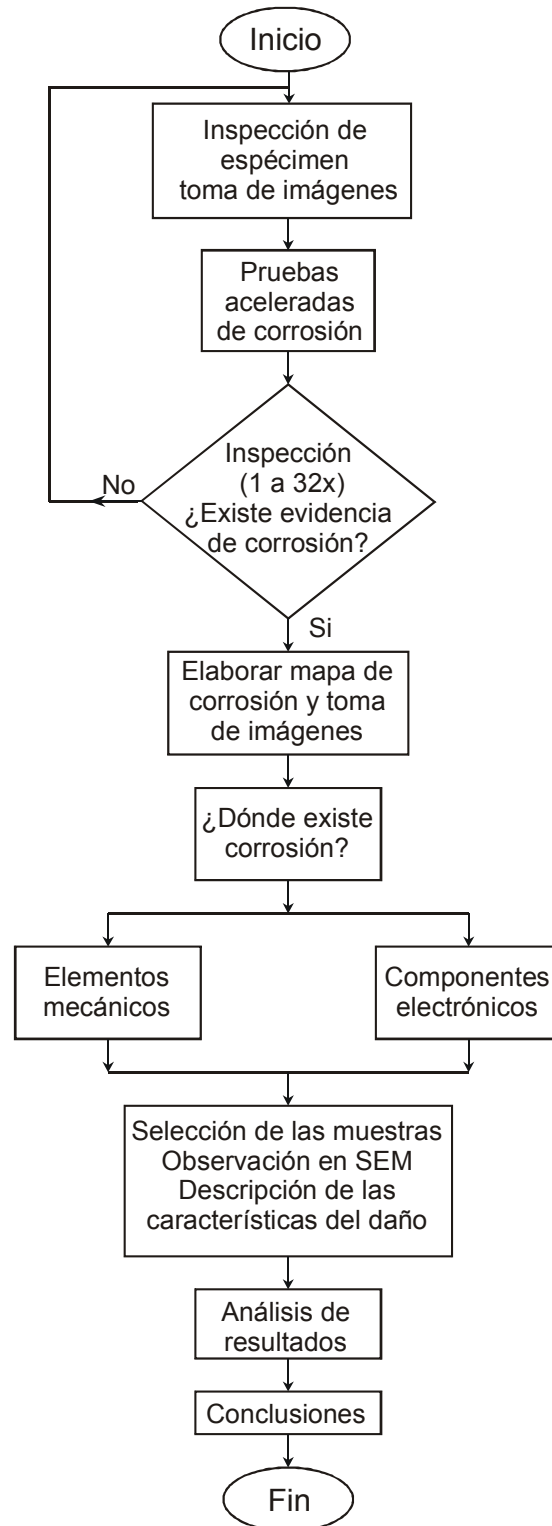


Figura.4.8 Diagrama de flujo para la inspección de los especímenes de laboratorio.

El procedimiento desarrollado para la evaluación de los daños en los SAMD se presenta en figura 4.9 a manera de un diagrama de flujo.

identificar a los componentes y zonas donde se presenta el daño por corrosión y evaluar el deterioro de los componentes.

El deterioro se puede presentar en componentes electrónicos o de manera muy particular sobre la superficie de almacenamiento magnético de datos. Una vez que se ha identificado la zona y el componente que presenta el daño por corrosión se lleva a efecto un corte en la zona del daño para ser observada con mayor detalle de manera que se obtenga información particular del deterioro.

Si después de realizar el diagnóstico no se tienen indicios de falla el espécimen en este caso el disco duro es elegido para realizar las pruebas de laboratorio. Posterior a las pruebas se realiza nuevamente un diagnóstico que determinará si durante las pruebas realizadas se manifiesta algún tipo de falla en los componentes de los discos duros, si el resultado es positivo se lleva a cabo una inspección para identificar los componentes que sufren daño para obtener muestras para observarlas a mayor detalle y clasificar el tipo de daño y los productos de corrosión. Si después del diagnóstico no se presenta la falla este espécimen se considera para ser utilizado en una nueva prueba tomando evidencia de los daños sufridos durante el primer periodo de exposición.

La inspección a bajos aumentos es una etapa en donde se puede realizar una selección de las muestras que presenten deterioro visible principalmente en los macrocomponentes. Para el caso de microcomponentes se tiene una variante en el procedimiento que se describen con mayor detalle en etapas correspondientes.

En la tercera etapa se pretende clasificar el deterioro de los elementos que sufren mayor daño para que de esta forma enfocar al estudio a mayor detalle de estos componentes, como puede ser la identificación de los depósitos y productos de corrosión localizados sobre las superficies, documentando las observaciones así como integrando imágenes.

En este caso se tienen dos opciones, realizar un análisis de las observaciones para emitir las conclusiones pertinentes, llevar a efecto una inspección con mayor detalle bajo a óptica de microscopía electrónica de barrido, así como un análisis químico de los productos de corrosión.

4.4- Resultados de la inspección de macro componentes

Teniendo el antecedente del análisis realizado a componentes de equipo telefónico procedentes de zonas tropicales y efectuando la simulación en laboratorio de las condiciones presentes en estas zonas en particular, para esta etapa del proyecto se pretendía simular otras condiciones de exposición y se reunieron aparatos telefónicos procedentes de tres estados de la República Mexicana (Guanajuato, Michoacán, Querétaro). De los equipos telefónicos obtenidos de campo se seleccionaron elementos que presentaban deterioro visible por corrosión a diferentes niveles, los daños que presentaron los componentes electrónicos bajo estas condiciones atmosféricas fueron sensiblemente menores comparados con los componentes procedentes de las zonas tropicales. Se presentan a continuación imágenes de macrocomponentes que fueron observados en microscopio electrónico de barrido para identificar los productos de corrosión en muestras obtenidas de campo así como de los componentes expuestos a pruebas aceleradas de corrosión.

4.4.1 Muestras obtenidas de campo

Las imágenes de los componentes que se presentan en las figuras 4.10-4.19 son parte de tarjetas electrónicas de teléfonos de uso residencial, procedentes de tres estados de la Republica Mexicana; Michoacán, Guanajuato y Querétaro. En estas figuras se muestran al componente a bajos aumentos acompañado de un espectro de análisis químico y de tablas (4. 1- 4.4) en donde se indica los porcentajes en peso de los elementos encontrados

De la inspección realizada, en un número muy reducido de componentes, se observó daño por corrosión y este se calificó como daño ligero de esto de acuerdo a lo establecido en un estudio orientado a determinar el deterioro en componentes electrónicos [17].

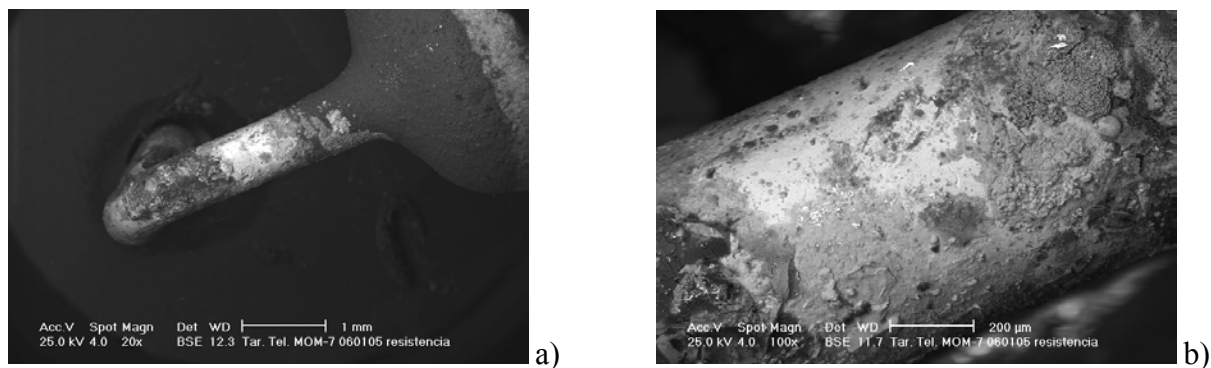


Figura 4.10a y 4.10b En el alambre conductor de la resistencia se aprecian depósitos y otros daños ligeros que no afectan de manera significativa en su funcionamiento. (Origen: Celaya, Gto)

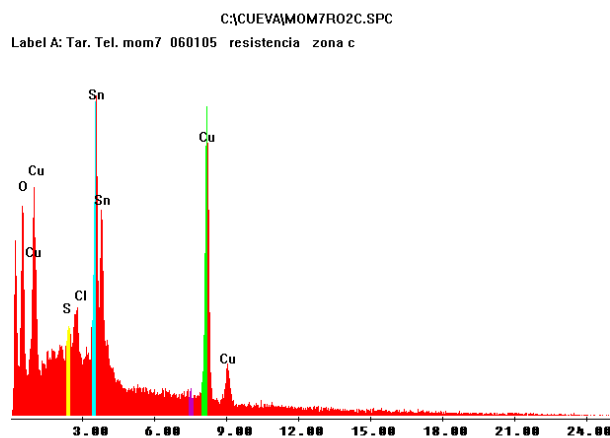


Figura 4.11 Espectro correspondiente a la figura 4.10

Tabla 4.1 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.11

Element	Wt %	At %
O K	31.79	67.79
S K	1.82	1.7
ClK	2.3	2.22
SnL	29.09	9.06
CuK	35	19.23
Total	100	100

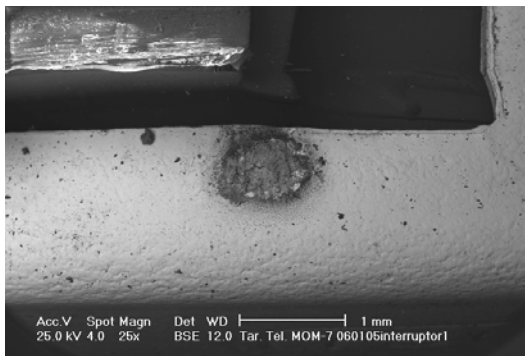


Figura 4.12 En la imagen se muestran picaduras leves en un interruptor de teléfono de uso domestico sin embargo deterioro de tales magnitudes no representa la falla del componente (origen: Queretaro, Qro).

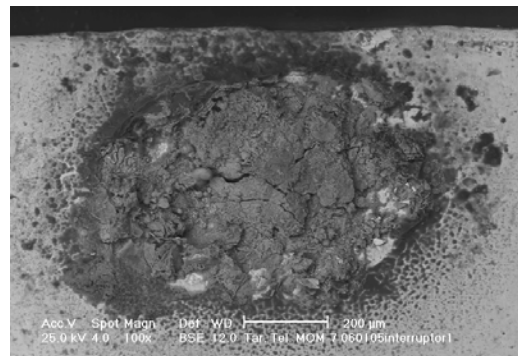


Figura 4.13 Muestra con mayor detalle el daño sufrido sobre la superficie metálica del interruptor de la figura anterior

Tabla 4.2 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.13

Element	Wt %	At %
O K	19.49	44.57
S K	0.9	1.06
ClK	1.09	5
SnL	6.72	2.73
FeK	54.85	36.37
NiK	16.95	10.27
Total	100	100

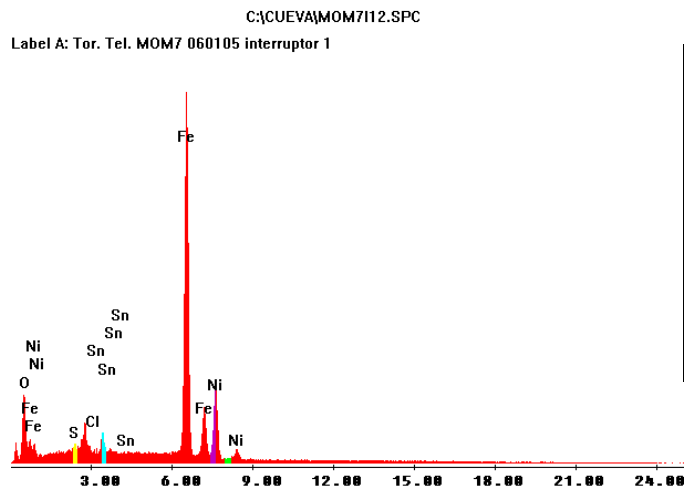


Figura 4.14 Espectro correspondiente a la figura 4.13

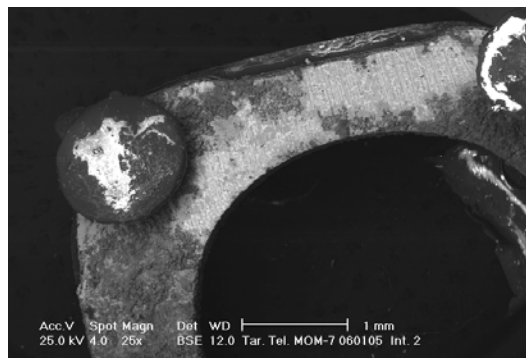


Figura 4.15 En este otro interruptor se puede apreciar que el revestimiento se ha desprendido dejando al desnudo el material base hierro. (Origen. Celaya,Gto)

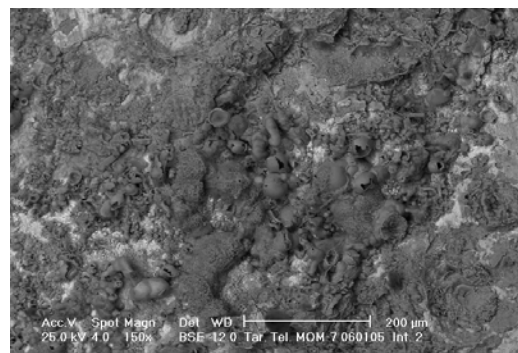


Figura 4.16 Detalle de la superficie dañada por corrosión del interruptor de la figura 4.15.

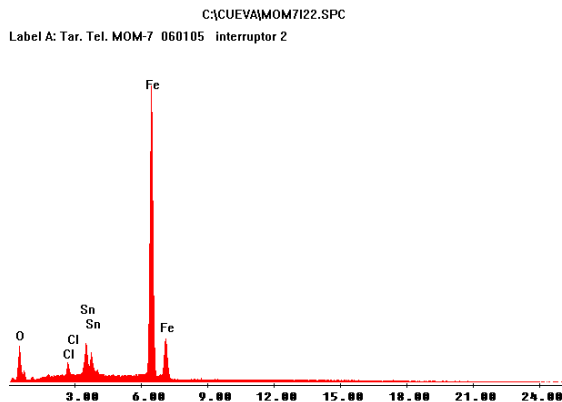


Figura 4.17 Espectro correspondiente a la figura 4.16

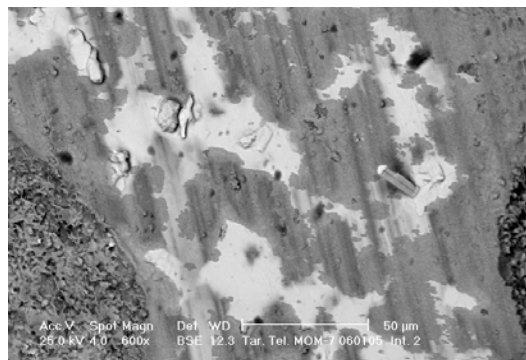


Figura 4.18 Interruptor, en esta imagen se aprecia el deterioro que ha sufrido la capa del recubrimiento, las picaduras son un indicativo de la falta de uniformidad en la aplicación del recubrimiento. (Origen: Morelia, Mich.)

Tabla 4.3 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.15

Element	Wt %	At %
O K	8.85	26.31
ClK	1.27	1.71
SnL	10.06	4.03
FeK	79.81	67.95
Total	100	100

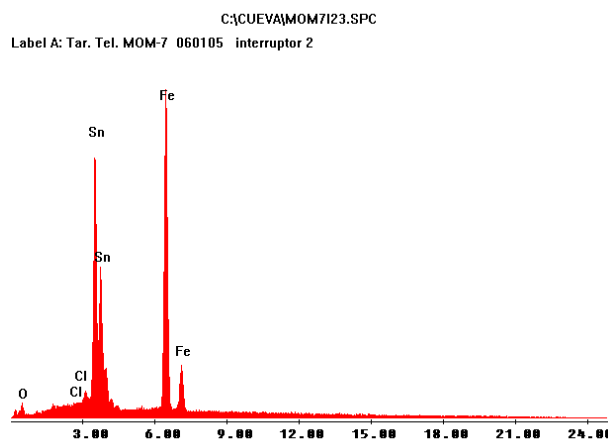


Figura 4.19 Espectro correspondiente a la figura 4.18

Tabla 4.4 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.18

Element	Wt %	At %
O K	3.3	13.6
ClK	0.1	0.18
SnL	44.5	24.72
FeK	52.1	61.51
Total	100	100

4.4.2 Muestras expuestas a pruebas aceleradas

Se ensayaron en un máquina de pruebas aceleradas microcomponentes y se analizaron los efectos producidos en éstos. Los especímenes tomados para esta etapa fueron tanto equipos telefónicos nuevos como discos duros. Los efectos observados en los componentes se presentan en las figuras 4.20-4.29. en donde se observa daño severo en la superficie metálica. Para cada uno de los componentes que se presentan en esta sección se incluye una imagen a bajos aumentos, así mismo, se presenta una imagen que indica detalles sobre la zona dañada, también se muestra un espectro del análisis químico permitiendo con esto una observación rápida de los elementos presentes y tablas (4.5-4.8) donde se muestra el análisis cuantitativo de los productos de corrosión.

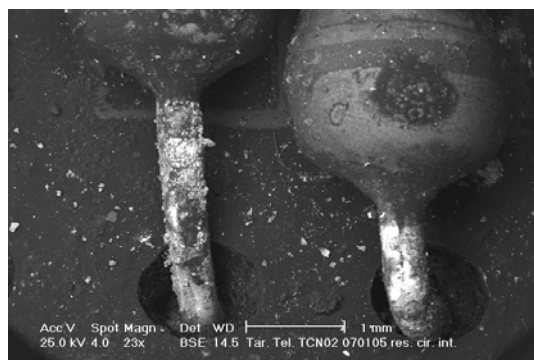


Figura 4.20 Se muestran sobre las superficies de los alambres conectores de las resistencias los productos de corrosión.

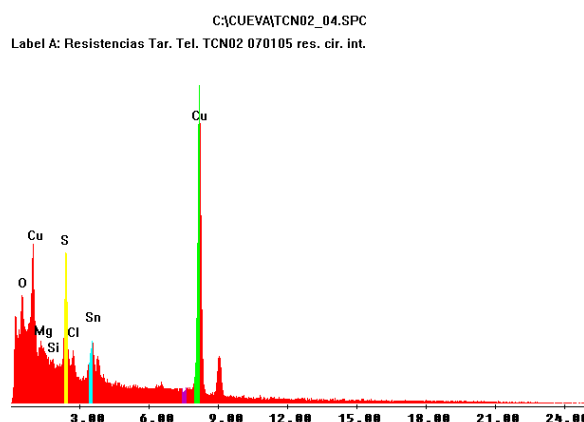


Figura 4.22 Espectro correspondiente a la figura 4.21

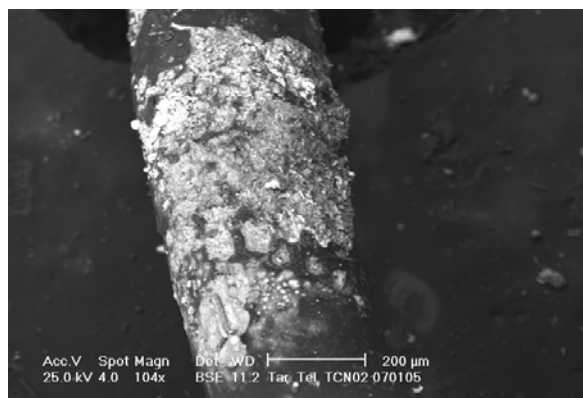


Figura 4.21 Alambre de una resistencia a mayores aumentos donde se hace notorio el desprendimiento del recubrimiento.

Tabla 4.5 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.21

Element	Wt %	At %
O K	24.53	53.62
MgK	2.51	3.6
S K	7.6	8.29
ClK	1.43	1.41
SnL	8.31	2.45
CuK	55.63	30.62
Total	100	100

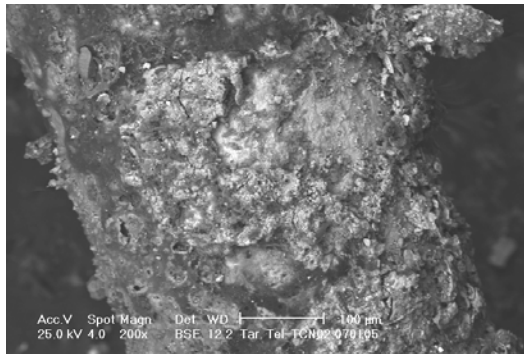


Figura 4.23 En esta imagen se pueden observar depósitos sobre los conectores de los circuitos pero sin presentar deterioro en el recubrimiento.

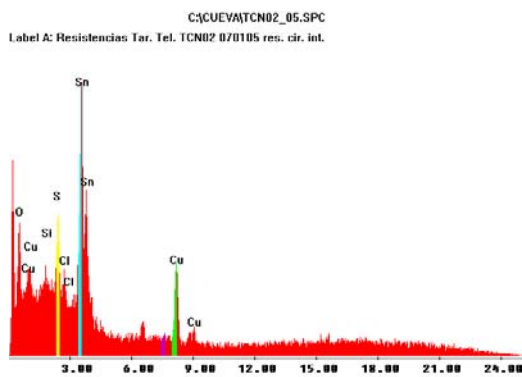


Figura 4.24 Espectro correspondiente a la figura 4.23

Tabla 4.6 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.23

Element	Wt %	At %
O K	37.57	74.51
SiK	1.03	1.17
S K	4.6	4.55
ClK	1.29	1.15
SnL	39.24	10.49
CuK	16.27	8.12
Total	100	100

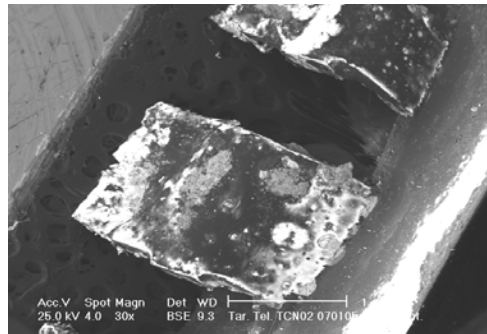


Figura 4.25 Terminales de un circuito integrado con depósitos ligeros que prácticamente no afectan al funcionamiento de este.

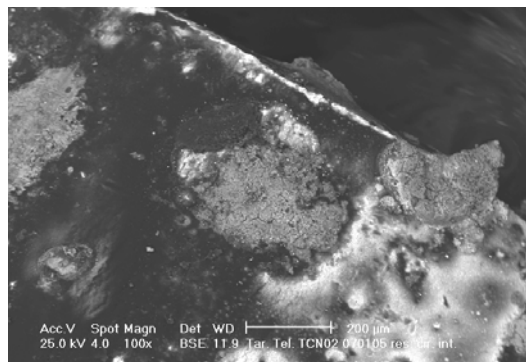


Figura 4.26 Detalle de la terminal de microcomponente donde se aprecian depósitos ligeros, prácticamente sin desprendimiento del recubrimiento de estaño, en base a una buena aplicación del recubrimiento.

Figura 4.27 Espectro correspondiente a la figura 4.26

Tabla 4.7 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.26

Element	Wt %	At %
O K	23.44	66.01
SiK	0.78	1.25
S K	2.36	3.31
ClK	1.75	2.22
SnL	71.67	27.2
Total	100	100

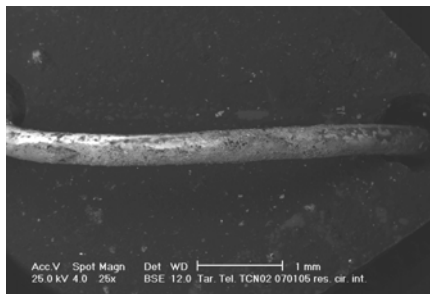


Figura 4.28 Alambre conector que presenta deterioro ligero en el recubrimiento.

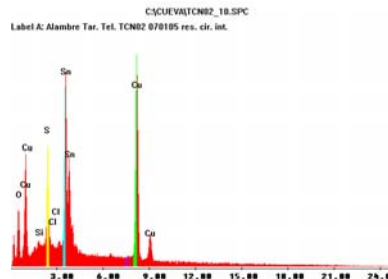


Figura 4.30 Espectro correspondiente a la figura 4.29

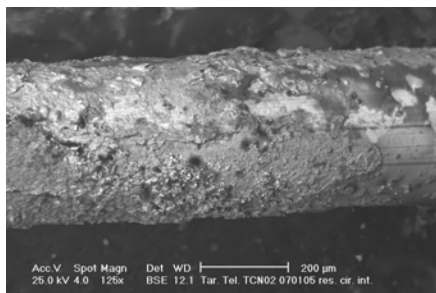


Figura 4.29 Se muestra un acercamiento de la superficie del alambre donde se aprecian los depósitos sobre el alambre con inicios de desprendimiento del recubrimiento de estaño.

Tabla 4.8 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.29

Element	Wt %	At %
O K	20.27	52.06
SiK	0.77	1.13
S K	7.26	9.3
ClK	0.37	0.43
SnL	30.1	10.42
CuK	41.23	26.66
Total	100	100

4.4.3 Muestras de *SAMD* expuestas a pruebas de laboratorio

Como se mencionó en el punto anterior durante la simulación de los efectos en macrocomponentes se utilizaron también discos duros y algunos de los efectos que se generaron en estos componentes se muestran en las figuras 4.31-4.39. De igual forma que para los análisis anteriores, se incluyen los espectros de análisis químico y tablas (4. 9- 4.13) donde se indica los porcentajes de los elementos presentes.

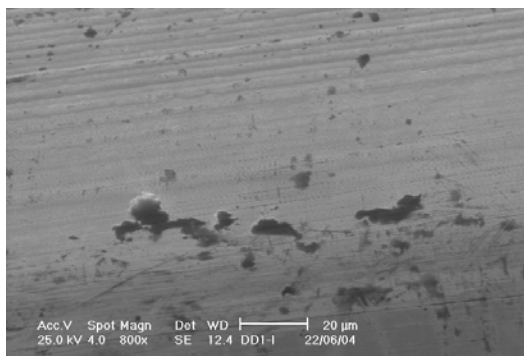


Figura 4.31 Superficie de un disco de almacenamiento magnético de datos que presenta daño ligero por desprendimiento del recubrimiento en zonas muy localizadas (DD01)

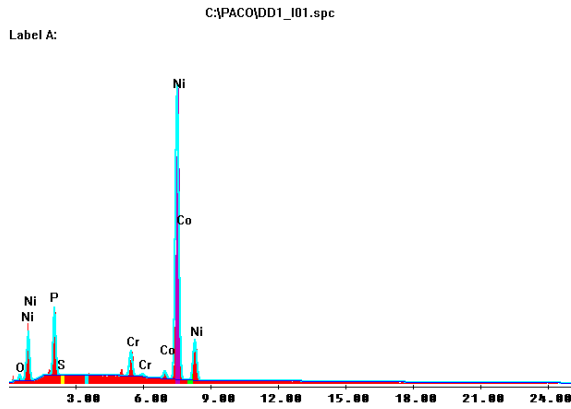


Tabla 4.9 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.31

Element	Wt %	At %
O K	1.29	4.27
P K	8.05	13.72
S K	0.11	0.18
CrK	3.46	3.52
CoK	1.85	1.66
NiK	85.24	76.66
Total	100	100

Figura 4.32 Espectro correspondiente a la figura 4.31

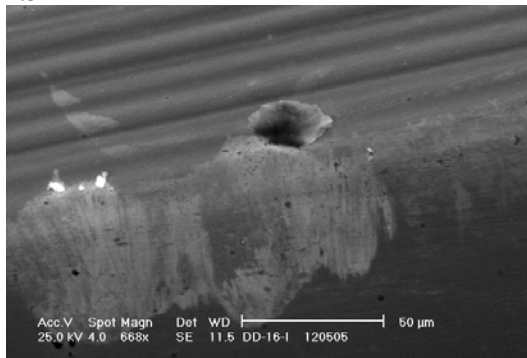
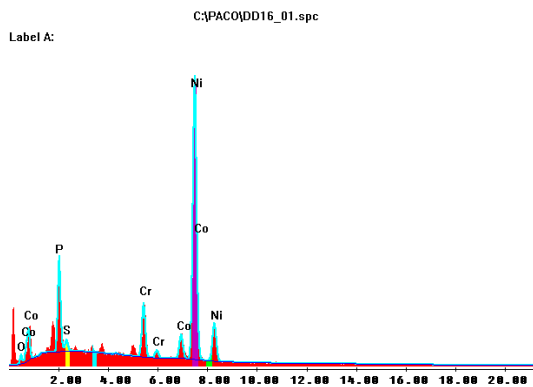


Tabla 4.10 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.32

Element	Wt %	At %
O K	1.82	5.79
P K	10	16.4
S K	1.13	1.79
CrK	6.78	6.62
CoK	5.59	4.81
NiK	74.67	64.59
Total	100	100

Figura 4.33 Superficie de un disco que presenta daño localizadas pero de características muy diferentes a las de la figura anterior (DD16)



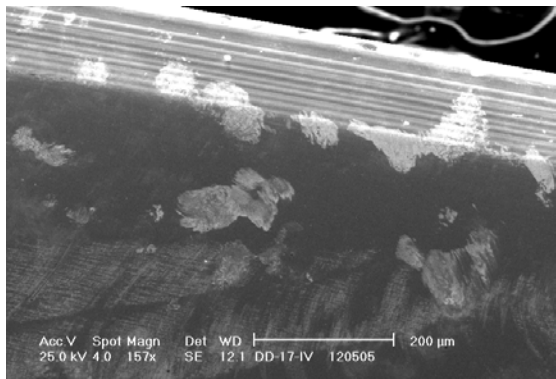


Figura 4.34 Se presentan marcas aparentemente de condensado sobre la superficie del disco por falta de hermeticidad entre los elementos de la cubierta (DD17)

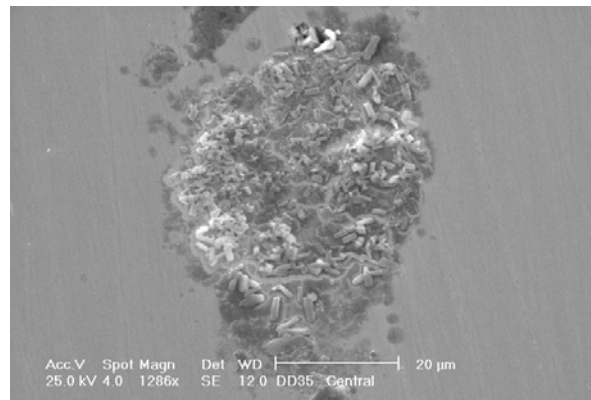


Figura 4.36 En esta imagen se puede apreciar productos de corrosión, destacando que es una zona muy pequeña comparada con la superficie total del disco (DD35)

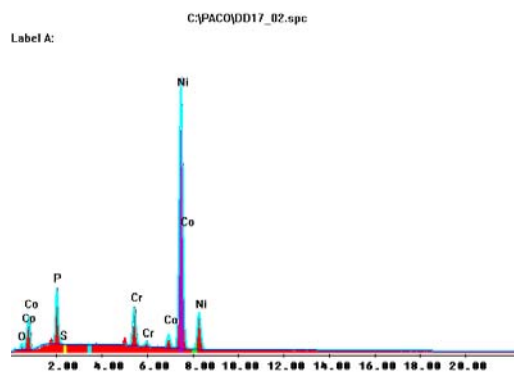


Figura 4.35 Espectro correspondiente a la figura 4.34

Tabla 4.11 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.34

Element	Wt %	At %
O K	1.5	4.96
P K	6.99	11.93
S K	0.03	0.04
CrK	5.71	5.81
CoK	3.47	3.12
NiK	82.3	74.14
Total	100	100

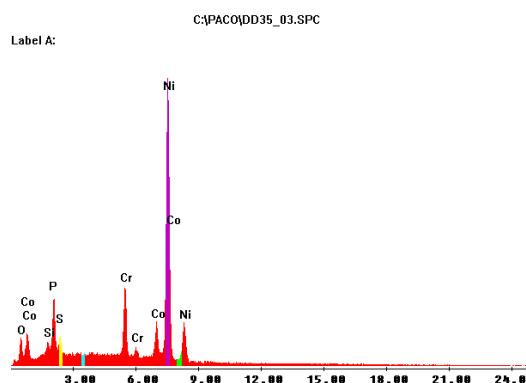


Figura 4.37 Espectro correspondiente a la figura 4.36

Tabla 4.12 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.36

Element	Wt %	At %
O K	5.02	14.97
SiK	1.74	2.94
P K	6.01	9.26
S K	1.76	2.62
CrK	8.06	7.38
CoK	7.65	6.19
NiK	69.75	56.63
Total	100	100

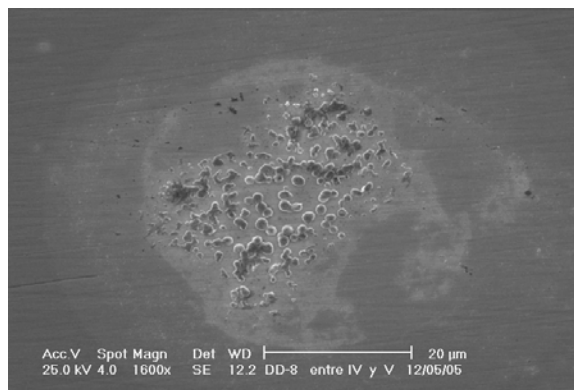


Figura 4.38 Esta imagen muestra el desprendimiento de la capa de recubrimiento por efectos de las condiciones agresivas de prueba (DD8)

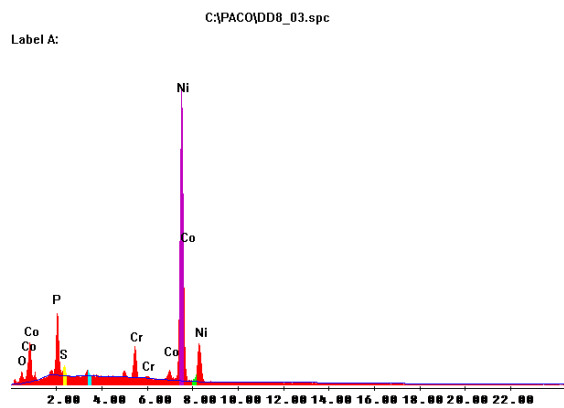


Figura 4.39 Espectro correspondiente a la figura 4.38

Tabla 4.13 Análisis puntual de los productos de corrosión de la figura 4.38

Element	Wt %	At %
O K	2.69	8.55
P K	7.4	12.16
S K	1.19	1.88
Cl K	0.03	0.05
Cr K	3.99	3.9
Co K	2.63	2.28
Ni K	82.08	71.18
Total	100	100

4.4.4 Concentrado de resultados

En la tabla 4.14 se presenta el desglose de los resultados obtenidos de los diversos componentes que se estudiaron, la información esta organizada en función del origen del espécimen (de campo y pruebas aceleradas), se indican en esta los porcentajes en peso de los elementos encontrados para cada uno de los componentes que se analizaron.

Tabla 4.14 Resultados de los elementos químicos detectados durante la inspección de macrocomponentes electrónicos (valores en porcentaje en peso)

Especímenes de campo												
Componente	Porcentaje en peso de elementos químicos											
	Cu	O	S	Cl	Sn	Fe	Ni	Mg	Si	P	Cr	Co
Resistencia	35	30.79	1.82	2.3	29.09							
Interruptor (i1)		19.49	0.9	1.09	6.72	54.85	16.95					
Interruptor (i2)		8.85		1.27	10.06	79.81						
Interruptor (i3)		3.3		0.1	44.5	52.1						
Especímenes de pruebas aceleradas												
Resistencia (R1)	55.63	24.53	7.6	1.43	8.31			2.51				
Resistencia (R2)	52.42	19.7	9.99	1.71	16.18							
Conector (C1)	41.23	20.27	7.26	0.37	30.1				0.77			
Microcomponente (M1)	16.27	37.57	4.6	1.29	39.24				1.03			
Microcomponente (M2)		23.44	2.36	1.75	71.67			0.78				
Especímenes de SAMD												
SAMD (DD01)		1.29	0.11				85.24			8.05	3.46	1.85
SAMD (DD16)		1.82	1.13				74.67			10	6.78	5.59
SAMD (DD17)		1.5	0.03				82.3			6.99	5.71	3.47
SAMD 4 (DD35)		5.02	1.76				69.75		1.74	6.01	8.06	7.65
SAMD 5 (DD8)		2.69	1.19	0.03			82.08			7.4	3.99	2.63

4.5 Discusión

Al analizar los resultados obtenidos del estudio efectuado a las muestras de campo y las provenientes de la cámara de pruebas aceleradas, se observa que los efectos son reproducidos de manera parcial, lo anterior se atribuye a varios factores que se discuten más adelante. Del estudio se desprende que los contaminantes encontrados en los componentes son prácticamente los mismos, mostrando casos en donde las variaciones son significativas.

Realizando una reflexión sobre los efectos que originan los ambientes reproducidos en la cámara; es necesario comparar los productos que por efectos de la corrosión se hacen presentes en los macrocomponentes electrónicos de una misma familia. En la tabla 4.14, se mostraron los valores de los elementos detectados.

En las muestras de campo se hace notar una diferencia que existe entre los valores de los contaminantes detectados, que incluso se hace notar entre componentes del mismo tipo. En los interruptores (i1, i2, e i3) se confirma que componentes iguales provenientes de zonas geográficas diferentes reaccionan de manera distinta debido a las condiciones típicas de la región y a los diferentes tiempos de exposición.

Si se realiza la comparación de los productos encontrados en especímenes provenientes de campo con especímenes del mismo tipo sometidos a las pruebas aceleradas, como es el caso de las resistencias se puede notar que existen variaciones sustanciales en los porcentajes de este tipo de productos, esto se debe principalmente a dos cosas, la primera es que no se cuenta con un antecedente exacto del tiempo de servicio de las componentes de campo y la segunda es que la prueba de simulación se realizó a 300 ciclos (100 horas). De esto se pueden inferir las notables variaciones que se tienen. En este sentido hace falta continuar desarrollando estudios que conduzcan a encontrar vías para correlacionar el tiempo de exposición en un ambiente natural con el número de ciclos correspondientes a una prueba de simulación.

En los componentes sometidos a simulación acelerada se tienen rangos de variación pequeños, que para fines prácticos son aceptables, lo que nos lleva a una reflexión; en condiciones iguales de prueba se generan efectos semejantes en los componentes del mismo tipo. Esto trae consigo una segunda reflexión; las condiciones generadas en la cámara reproducen el efecto de deterioro de manera acelerada en macrocomponentes, siendo éste uno de los objetivos que se planteó para este proyecto. Sin embargo, para este tipo de pruebas, son cuestionables los efectos originados en los microcomponentes M1 y M2, en este último prácticamente no se presentó deterioro, las razones pueden ser desde fallas en los procesos de manufactura debidos a diferencias en los espesores de los recubrimientos hasta un daño producto de la manipulación de los mismos. En casos donde componentes iguales manifiesten contradicciones en los resultados, es necesario desarrollar metodologías que garanticen la reproducibilidad de los efectos causados por las condiciones ambientales, añadir un paso adicional al proceso de inspección que permita identificar el daño antes de realizar las pruebas aceleradas.

Es de resaltar la presencia de un contaminante como el cloro, ya que resulta extraño sobre todo por la región de procedencia de las muestras; debido a que los especímenes no provienen de zonas costeras donde éste se encuentra en el ambiente y se deposita sobre los materiales por varias vías; en las pruebas se utilizó agua destilada que al depositarse sobre la superficie de los componentes actúa como electrolito que promueve el proceso de la corrosión. Por estas razones se elimina la posibilidad de que el contaminante provenga de una fuente natural o durante una etapa de las pruebas.

En los especímenes se observa la presencia de contaminantes comunes, en primer lugar se analiza el rango de variación del cloro que oscila entre 0.1-2.3 para las muestras de campo y de 0.03-1.75 para las de pruebas aceleradas. Es probable que el origen del cloro se deba a procesos de limpieza que se realizan durante la manufactura de los dispositivos. Los niveles más altos de este contaminante se presentó en las resistencias y microcomponentes,, el origen puede corresponder a que cada vez es más común el uso de películas de PVC; en otros componentes como interruptores, alambres y conectores se considera que la presencia de éste, se debe a procesos de manufactura.

Es necesario mencionar que el análisis químico se realiza de manera puntual, esto representa también limitantes para la determinación de los productos de corrosión; de acuerdo a los resultados se considera conveniente llevar a cabo un análisis empleando otros métodos a fin de realizar comparativos entre éstos, y de esta manera elegir el más apropiado. concluyendo que por las limitantes que presenta el equipo utilizado para la determinación de los productos de corrosión no es el más apropiado ya que en aquellos casos donde los porcentajes sean mayores a la unidad se descarta una posible falta de sensibilidad del dispositivo que realiza el análisis, la duda puede existir solamente en porcentajes que sean menores a 0.2, donde las causas pueden corresponder a procesos de calibración, sin que esto signifique que se tiene el contaminante presente, sino más bien se debe al cálculos de redondeo para expresar el 100% en el balance, otro posible error que se puede cometer es falta de habilidad del operador ya que se puede confundir entre los picos de elementos cercanos en el espectro. Por otro lado la cercanía a una zona industrial podría ser una fuente probable de la presencia de desechos que contengan cloruros.

Los elementos como el Cu, Fe, Ni, Sn, Mg., Cr, Co, son característicos de ciertos componentes en algunos casos como se utilizan como material base y en otros como recubrimientos para protegerlos de las fenómenos corrosivos originados por condiciones atmosféricas.

Finalmente, sabiendo de antemano la complejidad que representa la simulación de pruebas de corrosión atmosférica, es de destacar que la cámara con todas las limitaciones que aún tiene, es capaz de reproducir los efectos generados por el ambiente en macrocomponentes electrónicos quedando por definir el método más apropiado para la inspección de estos, sin embargo, los resultados obtenidos se consideran como una buena aproximación.

Conclusiones y recomendaciones

Los avances logrados en cuanto al desempeño de la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica son notables principalmente en la validación de los ensayos así como en la programación de los ciclos de una manera fácil y rápida; en el anexo se presentan algunos de los avances logrados en este sentido.

Desde el diseño conceptual de la cámara, se consideró la posibilidad de desarrollar un sistema de control flexible capaz de aceptar la adición de módulos en el tiempo, que pudieran contribuir a mejorar el desempeño y rendimiento de la cámara de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica. Este objetivo se ha logrado cumplir favorablemente lo anterior ha logrado disminuir los tiempos de puesta en marcha del orden de un 20% comparativamente con el programa anterior.

Por otra parte fue posible perfeccionar la metodología empleada en el análisis de las muestras expuestas a pruebas aceleradas de corrosión atmosféricas derivando en dos metodologías; una primera que se orienta a los sistemas de almacenamiento magnético de datos (SAMD) y otra para aparatos telefónicos de uso residencial.

Se logró mejorar el funcionamiento de la máquina de pruebas en general, desde la hermeticidad, calibración de los sensores de manera rápida, mayor control en las atmósferas generadas, una interfase gráfica más amigable, en este sentido aún queda mucho por hacer; sin embargo, los avances logrados son positivos.

Con la finalidad de reducir los tiempos de puesta en marcha de la máquina de pruebas aceleradas se han logrado programar las atmósferas de manera que se elija de entre una lista y seleccionarla de manera fácil y rápida para llevar a efecto su simulación en pruebas de laboratorio. En la programación de las atmósferas se utilizó la plataforma de Visual Basic, y para el microcontrolador el lenguaje ensamblador, esto proporciona los recursos necesarios para el funcionamiento de los elementos que forman parte del sistema de control de la máquina a un bajo costo.

Los procedimientos de prueba han demostrado que falta por hacer en cuanto a la simulación acelerada de corrosión atmosférica. Sin embargo, los avances logrados en esta dirección han sido notorios y han mostrado que la línea de investigación está dando rendimientos importantes.

Las diferencias en los procedimientos para micro y macro componentes se hacen notorias y se desarrollan en condiciones específicas para este tipo de componentes electrónicos. La evaluación del daño se realiza siguiendo los procedimientos propuestos para lograr mantener un orden y dar seguimiento a los componentes que presentan diferencias en el deterioro sufrido.

De los avances realizados se pueden destacar varios como:

- Se logró la simulación acelerada del deterioro por corrosión atmosférica en tarjetas impresas y discos duros.
- Los niveles de deterioro bajo condiciones iguales de prueba son diferentes para cada componente electrónico.
- Los materiales de macrocomponentes sufren deterioro con mayor rapidez.
- Las condiciones a las que se sometieron los componentes promueven el deterioro de manera rápida.
- Los productos de corrosión observados en especímenes de campo y de los extraídos del la cámara de pruebas son los mismos.
- En los discos duros se presentó deterioro severo en los macrocomponentes antes de evidenciar la falla sobre la superficie de almacenamiento magnético de datos.

- De acuerdo con los experimentos realizados se puede concluir que existen varios elementos que sufren deterioro antes de que se presente éste en la superficie de almacenamiento magnético. Haciendo un listado de los componentes que presentan mayor daño son en pines, resistencias, interruptores, conectores, circuitos impresos y circuitos integrados

- De los componentes seleccionados de los discos duros y que se observaron a detalle se concluye que en casos muy particulares de estudio y bajo condiciones específicas de prueba se logrará evidenciar daños por corrosión sobre las superficies de almacenamiento magnético de datos.

Se ha logrado identificar uno de los mayores problemas que se tienen entre los componentes de los SAMD son los mecánicos, estos se han identificado principalmente en la cabeza de los discos duros. Por otra parte cuando el problema es de origen lógico no es posible identificar la zona dañada, de tal forma que no se efectúa otro tipo de inspección al disco.

En esta etapa del proyecto se han logrado avances substanciales en varios aspectos resaltando la programación de los ciclos, el sistema de control, y en general los elementos mecánicos que proporcionan hermeticidad a la cámara, Otro aspecto que ha resultado fundamental en el buen funcionamiento de la cámara ha sido el mantenimiento preventivo de los componentes con mayor riesgo a sufrir daños con los ambientes generados.

Esto ha llevado a una práctica de revisión de los elementos que están expuestos durante el periodo de servicio. La inspección se ha llevado de manera sistemática después de haber transcurrido una serie de experimentos. La inspección se realiza en dos direcciones, una primera, enfocada a los elementos que se encuentran en el interior de la cámara de manera periódica después de 4 meses de operación como mínimo y 6 meses como máximo. Después de transcurrido este periodo se ha presentado desprendimiento de la capa protectora (recubrimiento polimérico) que mantiene aislada las superficies metálicas. La segunda se lleva a efecto antes de iniciar y al finalizar una prueba. Esto permite identificar pequeñas variaciones que se puedan presentar durante los experimentos. Es conveniente señalar que los resultados obtenidos en este

trabajo tienen gran importancia desde el punto de vista de continuar con una línea de investigación que permite desarrollar nuevos procesos para realizar pruebas aceleradas de corrosión atmosféricas a componentes electrónicos.

Los resultados derivados de estos especímenes permiten realizar una comparación de manera cualitativa entre las muestras de campo y las de laboratorio. Lo anterior permite establecer una correlación entre las muestras bajo condiciones iguales de exposición. Por otra parte también se evalúa el rendimiento de la máquina bajo estas condiciones pruebas.

Como una propuesta para una etapa posterior se tiene contemplado simular los efectos no solo de las estaciones del año, sino también de las noches y los días para posteriormente realizar una integración de los efectos de forma cada vez más apegada a lo que ocurre normalmente en los equipos y contar con bases más sólidas que contribuyan a conseguir el objetivo final de poder predecir los efectos que los ambientes naturales ejercen sobre los componentes electrónicos.

Referencias

1. E. Otero Huerta, *Corrosión y Degradación de los Metales*, Ed. Síntesis, 2000
2. G50-76 (2003) Standard Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals
3. G84-89 (2005) Standard Practice for Measurement of Time-of-Wetness on Surfaces Exposed to Wetting Conditions as in Atmospheric Corrosion Testing
4. G87-02 Standard Practice for Conducting Moist SO₂ Tests
5. Roberge, P.R., *Handbook of Corrosion Engineering*, Mc Graw-Hill, USA, 2000
6. ISO 9223:1992. (E). Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres-Classification. International Standard Organization, 1992.
7. ISO 9224:1992. Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres-Guiding Values for the Corrosivity Categories. International Standard Organization, 1992.
8. ISO 9225:1992. Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres-Measurements of Pollution. International Standard Organization, 1992.
9. ISO 9226:1992. Corrosion of Metals and Alloys-Corrosivity of Atmospheres-Determination of Corrosion Rate of Standards Specimens for the Evaluation of Corrosivity International Standard Organization, 1992.
10. Marcus, P. *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*, Marcel Dekker Publisher, 2002
11. Jones D. A. *Principles and Prevention of Corrosion*. 2nd Edition, Prentice Hall 1996
12. Leygraf, C., Graedel, T. *Atmospheric Corrosion*, John Wiley & Sons, New York, 2000
13. Yukonovich. *Electronics*. CC technologies laboratories, Inc. Dublin Ohio, 2001
14. Sinclair, J.D., *Corrosion of Electronics*. Journal of Electrochemical Society, Vol. 135 89c, 1988
15. International Electrotechnical Commission, 68-2-42, Test K_c SO₂
16. ISA-S.71.04-1985. *Standard Environmental Conditions for Process Measurements and Control System: Airborne Contaminants*, Instrument Society of America, 1985.

17. Ortiz P. A. Simulación Acelerada de la Corrosión Atmosférica en equipo Electrónico, Tesis Doctoral, UNAM, 2004.
18. Mendoza, A.R., Corvo, F. Outdoor and Indoor Corrosion. Atmospheric Corrosion of Non-ferrous Materials, Corrosion Science, 42, 2000.
19. R. Ohr, B. Jacoby, M.v. Gradowski, C. Schug, H. Hilgers., Analytical and functional characterization of ultrathin carbon coatings for future magnetic storage devices. Surface and coatings Technology 174-175 (2003) 1135-1139
20. B. Petereit, P. Siemroth , H.-H. Schneider. Hilgers, High current filtered arc deposition for ultra thin carbon overcoats on magnetic hard disks and read-write heads
21. Peter R. Goglia, Jeffrey Berkowitz, Joel Hoehn, Anthony Xidis, Lance Stover. Diamond-like carbon applications in high density hard disc recording heads., Diamond and related materials 10 (2001) 271-277
22. B. Tomcik, S.C. Seng, B. Balakrisnan, J.Y. Lee., Electrochemical tests on the carbon protective layer of a hard., Diamond and related materials, 11 (2002) 1409-1415
23. P. Bernhard, Ch. Zieten, R. Ohr, H. Hilgers, G. Schönhense., Investigations of the corrosion protection of ultrathin a-C an a-C:N overcoats for magnetic storage devices., Surface and coatings Technology 180-181 (2004) 621-626
24. M.K. Fung. K.H. Lai, C.Y. Chan, I.Bello, C.S. Lee, S.T. Lee, D.S. Mao, X. Wang Mechanical properties and corrosion studies of amorphous carbon on magnetic disks prepared by ECR plasma technique, Thin Solid Films 368 (2000) 198-202
25. B. Tomcik. T. Osipowicz. J.Y. Lee., Diamond-like film as a corrosion protective layer on the hard disk. Thin Solid Films 360 (2000) 173-180
26. C. Casiraghi, A.C. Ferrari, J. Robertson, R. Ohr, M.v. Gradowski, D. Schneider, H. Hilgers Ultra-thin carbon layer for highdensity magnetic storage devices, Diamond and related materials 13 (2004) 1480-1485
27. Cerrud, S., Ortiz, A., Jacobo, V., Schouwenaars, R. Design, Construction and Testing of a System for Accelerated Simulation of Damage by Atmospheric Corrosion on Electronic Equipment. Corrosion Reviews. Corrosion Reviews. Vol 21, 2003
28. K.R Trethewey, J. Chamberlain, Corrosion, Longman Scientific & technical, 1988
29. Mariaca, R.L., Genesca, J., Uruchurtu, Ch., J. Corrosividad Atmosférica, Plaza y Valdez Editores- UNAM, 1999
30. CYTED Productos Electro-Electrónicos en Ambientes Tropicales, José Rocha Andrade Da Silva Editor 2003.

31. Uhlig H. The Corrosion handbook 3rd Edition McGraw-Hill New York. 2000.
32. Pierre R. Roberge, Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 1999.
33. Daniel Adams, T.L. Alford, Encapsulated silver for integrated circuit metallization, Materials Science and Engineering R 40 (2003) 207–250
34. Guttenplan, J. D. Corrosion in the Electronics Industry. Metals Handbook, ASM International, Vol. 13,1987
35. Gouda, V. K., Carew, J. A., Riad, W.T. Investigation of Computer Hardware Failure due to Corrosion. British Corrosion Journal, Vol. 24, 192, 1989
36. Zakipour S. Tidblad J. Leygraf C. Atmospheric Corrosion Effects of SO₂, NO₂ and O₃, Journal of the Electrochemical Society, Vol. 144, 3513, 1997.

Anexo

A continuación se presentan una serie de pantallas en donde se hace notar la evolución que se ha dado en la construcción del programa para la máquina de pruebas aceleradas de corrosión atmosférica.

Desde la primera versión del programa figura A-1 (CAPACA-1) se llevó a efecto la programación de los experimentos de manera que la máquina trabajara automáticamente incluso se contaba con canales libres para de ser necesario añadir otros elementos. Sin embargo en términos generales se cumplía con el objetivo plenamente. De las debilidades que presentaba esta primera versión del programa fue la calibración de los sensores de humedad y de temperatura ya que esta se llevaba de forma manual, la hermeticidad fue otro de los inconvenientes presentados así como el proceso de acoplamiento entre en software y el hardware que presentaba problemas en sus inicios.

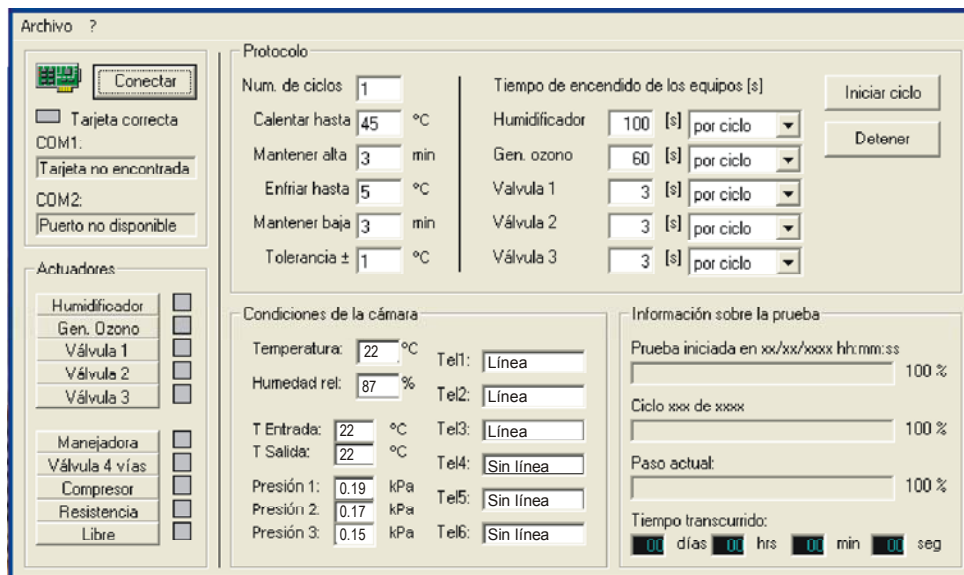


Figura A-1 Primera versión del programa (CAPACA-1)

De la experiencia obtenida durante la primera etapa del proyecto se logró mejorar en los aspectos que se consideran de mayor importancia. Se añadieron nuevos componentes para optimizar los ciclos; resultando en un programa más completo y de mayor facilidad en cuanto a su operación. Las diferencias se pueden apreciar entre las figuras A-1 y A-2.

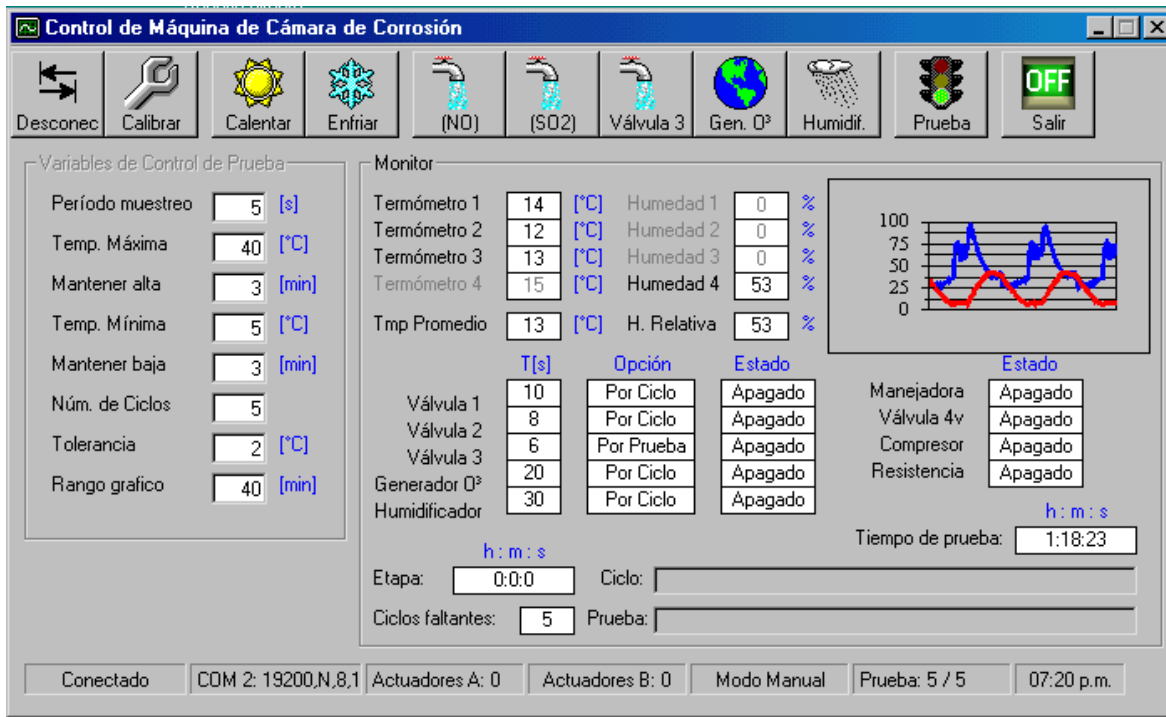


Figura A-2 Segunda versión de del programa (CAPACA-2)

En la segunda versión del programa se contaba con una programación más compleja y una interfase gráfica mucho más sencilla de operar como se puede apreciar en la figura A-2; sin embargo, con el objetivo de tener un permanente mejoramiento de se han seguido realizando cambios y añadiendo nuevas ideas como se aprecia en la figura A-3.

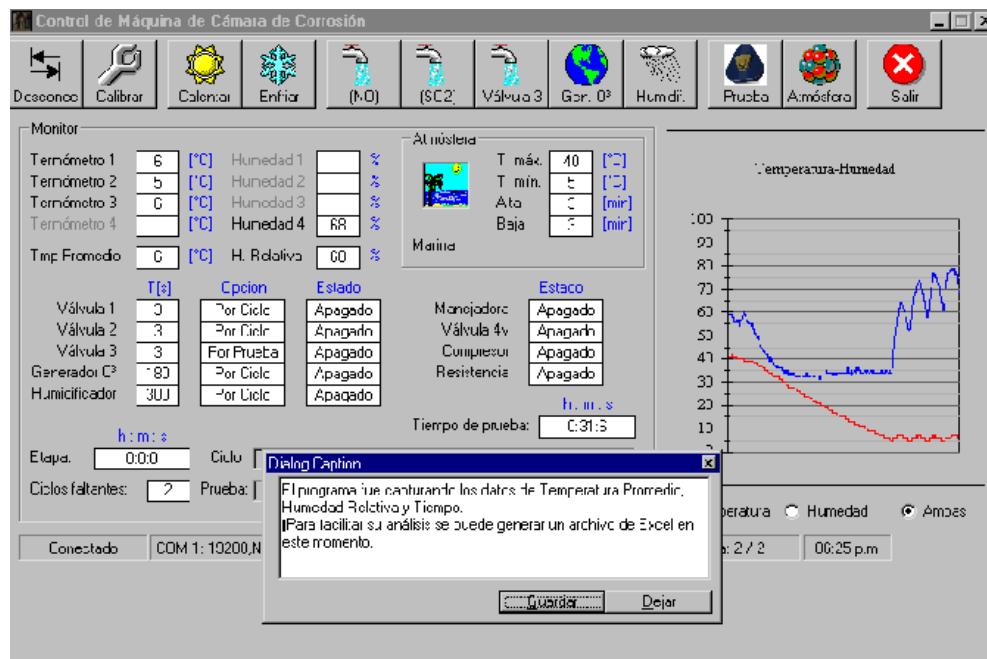


Figura A-3 Tercera versión del programa (CAPACA-3)

En esta tercera versión del programa se presenta la posibilidad de elegir de una gama de atmósferas programadas entre las que se encuentran la urbana, rural, industrial y marina. Además de combinaciones entre ellas. Esto permite una puesta en marcha rápida y mayor control en las condiciones atmosféricas generadas en la cámara de pruebas. Lo mencionado anteriormente se puede apreciar en la figura A-4. En el botón que aparece con la etiqueta de “*Atmósferas*” se tiene la posibilidad de elegir una de las preestablecidas, crear una nueva, editar las ya existentes o borrar alguna que se encuentre en la memoria.

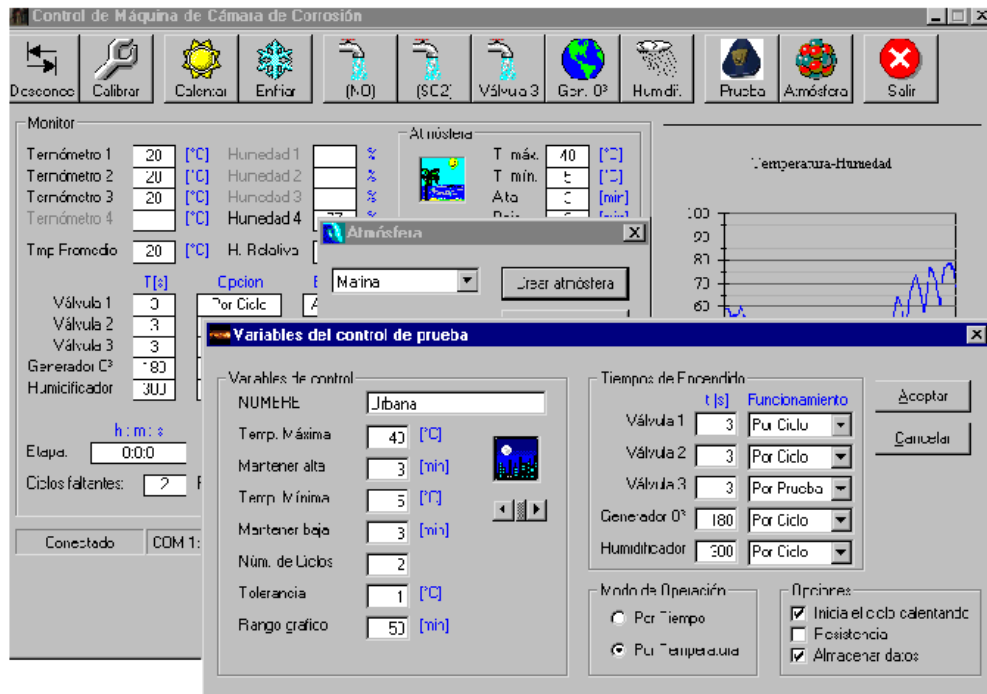


Figura A-4 La Tercera versión del programa de (CAPACA-3) se muestra más completo y más fácil de operar

Para el caso que se requiere simular un ambiente en particular del año, como condiciones que prevalecen en algunas horas del día, ya sea por la noche, mañana o tarde, se eligen las variables más representativas y se realiza la programación para ese evento en particular. Estas pruebas pueden ser utilizadas en casos donde se requiera evaluar los efectos del deterioro producidos en alguna estación del año en especial.

Se tienen contemplado en etapas posteriores simular los efectos corrosivos para las estaciones del año y comparar los datos entre estas, esto se puede llevar a situaciones cada vez más complejas pero más realistas, como puede ser condiciones noches y los días, y a continuación realizar una integración de los efectos de forma cada vez más apegada a lo que ocurre normalmente en los equipos y contar con bases más sólidas que contribuyan a conseguir el objetivo final de poder predecir los efectos que en ambientes naturales puedan sufrir los componentes electrónicos.