

**“MODIFICACIÓN DE ELECTRODOS CON  
ESTRUCTURAS TIPO ÓPALO INVERSO CON  
POTENCIAL USO EN EL DEPÓSITO DE  
PARTÍCULAS SUSPENDIDAS EN AIRE”**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
EN LA ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA  
I.Q. MARÍA AUXILIO AGUAYO SÁNCHEZ

Diciembre 2009

## RESUMEN

---

La contaminación en espacios cerrados ha sido objeto de estudio en los últimos años debido al problema que ésta representa. En este trabajo se presenta la preparación de diferentes electrodos modificados con estructuras tipo ópalo y ópalo inverso, para ser utilizados como platos recolectores en un precipitador electrostático para el depósito de partículas suspendidas en aire. Se aborda particularmente algunos aspectos de la modificación de los electrodos en precipitadores electrostáticos para aumentar la eficiencia y capacidad de estos para la captación de partículas suspendidas, intercambiando las placas planas actualmente utilizadas como platos recolectores por estructuras del tipo ópalo y ópalo inverso. Para lograr esto, se estudiaron rutas alternativas de obtener dichas estructuras. En su obtención, se realizaron síntesis de partículas poliméricas en emulsión, depósitos electroless y electrolíticos metálicos sobre partículas poliestireno molido y esferas de vidrio de diferentes tamaños; así como la fundición de estaño para la obtención de los ópalos inversos. La mejor ruta para los ópalos el metalizado de las esferas de vidrio de 4 mm; mientras que para los ópalos inversos, la más viable fue fundición de estaño. También, se realizaron pruebas en precipitador electrostático con estructuras de ópalos y ópalos inversos, esponjas metálicas y placas metálicas. La estructura tipo ópalo inverso, aún cuando su obtención presenta alta dificultad técnica, resulta ser aquella que presenta mayores ventajas como electrodo para el precipitador. Se empleó una balanza de cristal de cuarzo para la determinación de depósitos de partículas, el cual colocado a la salida de un precipitador electrostático permitió conocer en parte la tasa de partículas no retenidas. Finalmente, se propone un diseño de estructura en el precipitador electrostático con potencial viabilidad presentando la ventaja de alta retención de partículas, tiempos más largos de funcionamiento sin mantenimiento y eficiencia de energía de operación del equipo.

## ABSTRACT

---

---

The contamination in closed spaces has been an object of study in the last years due to the problem that it represents. In this work is presented the synthesis of different modified electrodes with structures of the type opal and inverse opal, to be used as collecting plates in an electrostatic precipitator for the deposit of air suspended particles. It is addressed particularly some aspects of the modification of the electrodes in domestic electrostatic precipitators in order to increase their efficiency and capacity for trapping suspended particles. To achieve this, alternative routes of obtaining structures as the opals and inverse opals type were studied; the best way to get the metallic opals was by a nickel electrodeposits, and by an tin melt. In their preparation, it was carried on synthesis of polymeric particles in emulsion, electroless and electrolytic deposits on glass spheres. Also, tests were realized in electrostatic precipitator with opals and inverse opals structures, metallic sponges and metallic plates. A quartz crystal balance was used for the determination of deposits of particles, which placed at the exit of an electrostatic precipitator allowed to know partly the rate of not retained particles. Finally, a structure design is proposed in the electrostatic precipitator with potential viability presenting the advantage of high particle retention, longer times of functioning without maintenance and operation energy efficiency of the device.



**Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), bajo la dirección del Dr. José de Jesús Pérez Bueno.**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo con mucho cariño a mis padres, *Ma. Auxilio* y *Javier*, que siempre me han dado todo su apoyo, confianza y cariño, por nunca soltar mi mano y ayudarme a levantarme siempre que lo necesité en el transcurso de la Maestría.

A mis hermanos Pepe, Liz y Manuelito, porque a pesar de la distancia lograron hacerme sentir cerca de ustedes siempre.

A mi hermano Javier y Gaby por darme uno de las mayores alegrías y tesoros en mi vida, Sofía, y por enseñarme que con esfuerzo y perseverancia todo se puede lograr.

A mis tías por estar siempre al pendiente de mi familia, y por formar parte esencial de ella.

**GRACIAS A TODOS POR SU AMOR!!**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a *Dios* por concederme cumplir otro más de mis sueños, el culminar una etapa más de mi vida.

Al CIDETEQ por recibirme y permitirme realizar mis estudios de Maestría aquí. Al CONACyT por la beca otorgada durante estos dos años.

A mi asesor *Dr. José de Jesús Pérez Bueno*, por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo; por compartirme sus conocimientos, por toda la confianza brindada y por ser un ejemplo a seguir tanto en el plano profesional como en el personal.

A los sinodales por tomarse el tiempo para revisar este documento y sus valiosos comentarios.

A Lupita y Marce Ruru, por brindarme un hogar cuando más lo necesité, por tardes y tardes de pláticas y sanas convivencias. Gracias por formar parte de mi vida y permitirme ser su AMIGA.

A mis amigos Fer, Miriam, Ricardo, Arelo, Tania, Héctor, Walter y Lucy García por hacer de mi estancia en CIDETEQ, dos años de gratas experiencias dentro y fuera del centro, por las felices horas de comida. Por todos sus consejos y apoyo siempre que lo necesité. A Gustavo por cuidarme siempre y acompañarme en los problemas que se me presentaron, por tu compañía los fines de semana y hacerme sentir como en casa, pero sobretodo por ser mi gran amigo.

A Ian y Deyli, estoy infinitamente agradecida con ustedes, saben que son como mis “Angelitos de la Guarda”, gracias por estar conmigo en las muy buenas, pero sobretodo en las muy malas, sinceramente GRACIAS.

A mis compañeros de laboratorio, Lupita Barreiro, Domingo, Griss, Lydia y nuevamente Lupita Almanza por hacerme tan ameno mi trabajo en el laboratorio.

A mis maestros, Dr. Roberto, Dr. José Luis Hernández, Enrique Toledo, Mtra. Lucy García, Dra. Linda González y Nancy Meyer por compartir sus conocimientos. Y obviamente al Dr. Raúl Ortega por todas sus atenciones y siempre ponerme de buen humor.

A mi nueva familia en Querétaro, Juny, Gus y Claudia, por brindarme todo su cariño y lograr dibujar una sonrisa en mi cara siempre. Porque faltan muchas cosas por vivir juntos. Los quiero mucho!!

# Índice General

Resumen	
Abstract	
Dedicatoria	
Agradecimientos	
Introducción	9
Capítulo I.- Antecedentes	11
1.1 La Contaminación Atmosférica	12
1.1.1 Contaminantes atmosféricos	
1.1.2 Clasificación de los contaminantes atmosféricos	
1.1.3 Principales contaminantes en la atmósfera	
1.2 La contaminación del aire en México	23
1.2.1 Antecedentes	
1.2.2 Legislación y Normatividad en México	
1.2.3 Calidad en las principales ciudades de México	
1.2.4 Contaminación en espacios cerrados	
1.3 Técnicas de control para la separación de partículas en aire.	29
1.4 Precipitadores Electrostáticos	31
1.4.1 Diferentes diseños de precipitadores	
1.4.2 Electrodo modificados	
1.5 Ópalos inversos	37
1.6 Depósitos metálicos	39
1.6.1 Depósitos electrolíticos	
1.6.2 Depósitos electroless	
Capítulo II.- Justificación, Hipótesis y Objetivos	43
Capítulo III.- Desarrollo Experimental	47
3.1 Síntesis de las estructuras tipo ópalo y ópalo inversos metálicos	48
3.1.1 Estructuras tipo ópalo metálico	

3.1.2 Estructuras tipo ópalo inverso metálico	
3.2 Evaluación de los electrodos en un diseño de precipitador electrostático	50
Capítulo IV.- Resultados y Discusión	54
4.1 Síntesis de las estructuras tipo ópalo y ópalo inversos metálicos	55
4.1.1 Estructuras tipo ópalo metálico	
4.1.2 Estructuras tipo ópalo inverso metálico	
4.2 Evaluación de los electrodos en un diseño de precipitador electrostático	66
Capítulo V.- Conclusiones y Perspectivas	74
Capítulo VI.- Referencias Bibliográficas	77
Anexos	81



# INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los problemas de contaminación han adquirido tal magnitud y diversidad que la sociedad ha ido tomando cada vez mayor conciencia de los riesgos actuales, y más aún, de los potenciales. Como resultado de la presión social generada, quienes toman las decisiones muestran una creciente voluntad política para resolver los problemas. Ahora, es necesario que especialistas sólidamente formados les ofrezcan soluciones realistas. Debido a ello, resulta de gran interés el contribuir con la investigación y ofrecer nuevas tecnologías mediante el desarrollo de nuevas técnicas para tratar de disminuir y, tanto en el presente como a futuro, lograr mantener el problema de la contaminación en la atmósfera por debajo de los límites permisibles.

La contaminación en espacios cerrados representa un punto estratégico en este problema, ya que para numerosas industrias es necesario implementar un sistema de descontaminación del aire para disminuir el riesgo de daño a la salud de los trabajadores. Los precipitadores electrostáticos cuentan ya con un uso creciente en la remoción de aerosoles biológicos en espacios cerrados como en: Hospitales, clínicas, industrias alimenticias, farmacéuticas, por mencionar algunas.

Este trabajo aborda el problema desarrollando la preparación y aplicación de diferentes electrodos modificados y se presenta en el siguiente orden:

En el Capítulo 1, se presentan los diferentes tipos de contaminantes existentes en la atmósfera, así como la situación actual del país en cuanto a contaminación atmosférica se refiere. Del mismo modo, se hace una breve descripción de las diferentes técnicas de descontaminación del aire, ahondando un poco más en la precipitación electrostática.

En el Capítulo II, se abordan los Objetivos, Hipótesis y Justificación de este trabajo. En el tercer capítulo se muestra el Desarrollo Experimental llevado a cabo para la obtención de los electrodos y su evaluación en el precipitador.

Finalmente, en el Capítulo IV se desarrolló una discusión de los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones a las cuales se llegó; así como las diferentes perspectivas.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES

# CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

## 1.1 La Contaminación Atmosférica

Se denomina Atmósfera a la mezcla de gases y pequeñas partículas líquidas o sólidas que envuelven a la Tierra. Se compone de varias capas que se denominan: troposfera, estratosfera e ionosfera. Tiene un espesor aproximado de 10, 000 km y cerca de 95% de su masa se encuentra en los primeros 19 km. Los principales componentes de la atmósfera son el nitrógeno y el oxígeno, en porcentaje casi constante (aproximadamente 79% y 21%, respectivamente).

No es posible dar una definición exacta de Contaminación del aire, debido a que el aire es una mezcla de compuestos que varía en el tiempo y espacio. A continuación se presentan algunas de las diferentes definiciones en donde se abarcan distintos aspectos:

- American Society for Testing Materials.

“Es la presencia en la atmósfera de sustancias no deseables en concentraciones, tiempo y circunstancias tales que puedan afectar significativamente al confort, salud y bienestar de las personas o al uso y disfrute de sus propiedades”.

- Consejo de Europa.

“Existe contaminación del aire cuando la presencia en él de una sustancia extraña o una variación importante en la proporción habitual es capaz de provocar un efecto perjudicial o una molestia, teniendo en cuenta los conocimientos científicos del momento”.

- En México, la Ley Federal para el Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente de 1988 establece que :

“Se entiende por contaminación la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes (materia o energía) o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico”. [1]

### **1.1.1 Contaminantes Atmosféricos**

Los Contaminantes Atmosféricos son liberados en el aire por una fuente, natural (volcanes, incendios, tormentas de arena, etc.) o antropogénica (industria, tráfico, calefacciones, etc.), en un proceso conocido como EMISIÓN. Una vez en la atmósfera sufren una serie de fenómenos como:

**Desplazamiento:** Por acción de las corrientes de aire en la atmósfera, teniendo en cuenta la vida media del contaminante, estos pueden recorrer grandes distancias más allá del foco emisor.

**Dilución:** En la atmósfera los contaminantes encuentran un espacio abierto en el que se difunden y expanden, disminuyendo la concentración inicial en la que se encontraban en el foco emisor.

**Acumulación:** Aquellos contaminantes con baja capacidad de reacción pueden acumularse en la atmósfera aumentando su concentración de forma progresiva.

**Transformación:** Con el paso del tiempo y el efecto combinado de los factores meteorológicos, los contaminantes emitidos se transforman. En muchas ocasiones esta transformación supone una degradación del contaminante, propia de la capacidad de asimilación del medio. En otras ocasiones esta transformación supone la generación de otros contaminantes, denominados contaminantes secundarios (tales como el ozono o los ácidos sulfúrico y nítrico, que dan lugar a la "lluvia ácida") [2].

### **1.1.2 Clasificación de los contaminantes atmosféricos**

Por su origen, los contaminantes pueden clasificarse como primarios o secundarios. Los contaminantes primarios son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, hidrocarburos, monóxido de carbono, etc.). Los contaminantes secundarios se forman en la atmósfera por reacciones fotoquímicas, por hidrólisis o por oxidación (ozono, nitrato de peroxiacetilo, etc.).

Por el estado de la materia en el que se encuentran dichos contaminantes se clasifican como partículas o como gases. Las partículas son sólidos y líquidos finamente

divididos que se pueden sedimentar, incluyen polvo, humo y cenizas. Los gases que incluyen también a los vapores, muchas veces son invisibles y a veces no se detectan con el sentido del olfato. Algunos de los contaminantes gaseosos más comunes son el monóxido de carbono, los hidrocarburos, el ozono, los óxidos de nitrógeno y los óxidos de azufre.

A diferencia de las partículas, los gases no se sedimentan sino que tienden a permanecer en la atmósfera, y a transformarse en compuestos más simples o más complejos o a formar parte de los ciclos biogeoquímicos. [1]

### **1.1.3 Principales contaminantes en la atmósfera**

El dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) es un gas incoloro y no inflamable. Posee un olor fuerte e irritante para altas concentraciones, tiene una vida media en la atmósfera estimada en días y se combina fácilmente con el agua de la atmósfera dando lugar al ácido sulfúrico que es responsable de la lluvia ácida. Se produce generalmente en la combustión de carburantes con un cierto contenido en azufre como carbón y gasóleos, principalmente en procesos industriales, centrales térmicas, tráfico y calefacciones de carbón, y combustible. En áreas industrializadas hasta el 90% del  $\text{SO}_2$  emitido a la atmósfera procede de actividades humanas. Causa problemas respiratorios, como problemas permanentes en los pulmones, en exposiciones cortas, a partir de  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  afecta al sistema respiratorio de los niños, y a partir de  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  al resto de la población. En forma de lluvia ácida puede afectar seriamente a suelos y cubierta vegetal así como degradar una amplia gama de materiales de construcción. Los cambios en el uso de combustibles, a otros con bajos contenidos en azufre, están haciendo que en los últimos años se disminuya progresivamente esta emisión, aunque sigue siendo la más cuantiosa después del monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ).

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) es un gas fuertemente tóxico de color pardo rojizo. A partir del dióxido de nitrógeno se forma en la atmósfera el ácido nítrico que es absorbido por las gotas de agua, precipitando en forma de lluvia ácida, al igual que ocurre con el  $\text{SO}_2$ .

El monóxido de nitrógeno ( $\text{NO}$ ) es un gas tóxico e incoloro que reacciona con el ozono para formar  $\text{NO}_2$ . Participa activamente en las reacciones atmosféricas causantes del

"smog". La aparición de estos contaminantes está marcada, fundamentalmente, por la presencia del nitrógeno del aire en los procesos de combustión. Se originan en un amplio número de procesos industriales y por el empleo de cualquier clase de combustibles en todo tipo de motores y a mayor temperatura en los procesos de combustión, mayor es la cantidad producida de óxidos de nitrógeno. La vida media de ambos contaminantes se estima en días.

El NO causa daños en los pulmones y sistema respiratorio en general, aunque estudios epidemiológicos indican que el NO<sub>2</sub> es cuatro veces más tóxico. Además, el NO<sub>2</sub> al igual que el SO<sub>2</sub>, da lugar a deposiciones ácidas que pueden afectar seriamente a suelos, cubierta vegetal y materiales de construcción.

El monóxido de carbono (CO) es un gas inflamable, incoloro e insípido. Su vida media en la atmósfera se estima en unos pocos meses y en combinación con el oxígeno atmosférico genera el dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>. Éste, aunque no es un gas nocivo, el aumento de su concentración en la atmósfera incrementa el efecto invernadero global. Alrededor del 90% del CO presente en la atmósfera se forma por oxidación fotoquímica del metano (CH<sub>4</sub>), aunque es el contaminante que en mayores cantidades se emite a la atmósfera por la actividad humana.

El CO se genera en la combustión de cualquier tipo de carburante, especialmente cuando dicha combustión es incompleta. Reacciona con la hemoglobina de la sangre y desplaza al oxígeno, con lo que reduce la capacidad de la sangre para oxigenar las células y tejidos del cuerpo. El CO puede ser particularmente peligroso para personas con problemas de corazón o circulatorios, con los pulmones dañados o con problemas respiratorios.

El ozono (O<sub>3</sub>) a nivel terrestre, conocido como ozono troposférico, es un importante contaminante que tiene perjudiciales efectos sobre la salud. Es bien conocido que su presencia en la estratosfera permite filtrar la radiación ultravioleta y que la destrucción de la denominada "capa de ozono" es un problema ambiental de indudables repercusiones. El ozono es un contaminante secundario, se sintetiza en la troposfera a partir de otros compuestos, favorecido por la presencia de luz solar, siendo sus precursores más importantes los óxidos de nitrógeno y los compuesto orgánicos volátiles.

El O<sub>3</sub> provoca problemas de respiración, reduce la función pulmonar, genera asma, irritación de ojos, congestión nasal, reduce la resistencia a resfriados y otras infecciones y puede acelerar el envejecimiento del tejido pulmonar. Puede dañar a plantas y árboles, actuando sobre la sección central de las hojas, en las que aparece una pigmentación punteada de color pardo rojizo.

El plomo es un metal tóxico, inorgánico, que puede presentarse formando parte de compuestos orgánicos. Este provoca la enfermedad denominada Saturnismo. Afecta al sistema nervioso central, óseo y digestivo, por acumulación en el organismo, y reduce la capacidad de filtración del riñón. En caso de mujeres embarazadas podría incluso afectar al feto. El plomo se emite en algunos procesos industriales y manufactureros, especialmente en empresas de la fundición y aquellas que supongan manipulación del mineral, y se utiliza en algunas pinturas y barnices. La emisión también puede venir de la combustión de carburantes fósiles, como el carbón o la gasolina (con plomo), en la que hasta hace poco se utilizaba como antidetonante (tetraetilo/metilo de plomo).

El grupo de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) incluye compuestos como el metano (CH<sub>4</sub>), hidrocarburos, CFCs. El metano es el más abundante y se forma de manera natural en reacciones anaerobias de actividades agrícolas, ganaderas, de tratamiento de residuos, y tratamiento y distribución de combustibles fósiles.

El resto de los COVs se emiten en procesos industriales, generalmente químicos y petroquímicos, así como actividades en las que se utilizan disolventes orgánicos (pintados, barnizados, recubrimientos, etc.), en el transporte y distribución de combustibles fósiles y en las combustiones incompletas de los mismos.

Al abarcar un amplio grupo de sustancias, sus efectos sobre la salud son variables. Algunos no parece que causen ningún daño, pero otros, en concentraciones especialmente altas, afectan al sistema respiratorio o podrían provocar cáncer y afecciones teratogénicas y mutagénicas (hidrocarburos aromáticos policíclicos, benceno, etc).

Sobre la vegetación, algunos de ellos provocan una disminución en el crecimiento y desarrollo de la planta (etileno). Tienen una relativa baja reactividad, pero en presencia de



luz y óxidos de nitrógeno reaccionan para formar oxidantes fotoquímicos, especialmente ozono, interviniendo en las reacciones que originan el "smog" fotoquímico [2].

### *Partículas Suspendidas*

Las partículas en suspensión presentes en el aire tienen un origen y una composición muy variada. Las  $PM_{10}$  son partículas de tamaño inferior a 10 micrómetros que pueden tener un origen natural (polen, polvo resuspendido del suelo, cenizas de incendios, arenas, etc.), o antropogénico, debido a las actividades humanas, fundamentalmente a las combustiones urbanas (calefacciones domésticas y tráfico) e industriales. Las partículas de este rango de tamaño se consideran las más negativas, para la salud de las personas. Hoy día los científicos consideran que las partículas en suspensión son el problema de contaminación ambiental más severo, por sus graves afecciones al tracto respiratorio y al pulmón. Las  $PM_{10}$  están detrás de numerosas enfermedades respiratorias, problemas cardiovasculares, y cánceres de pulmón. Por otro lado, los estudios sobre efectos a largo plazo han estimado que la exposición a partículas en suspensión puede reducir la esperanza de vida entre varios meses y dos años. Según un estudio de la Comisión Europea, publicado a comienzos de 2005, la presencia de estas partículas en la atmósfera produce cada año 288.000 muertes prematuras. Otro estudio de la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicado en 2004 afirma que la exposición a las partículas en suspensión es la causa de la muerte prematura de 13.000 niños de entre uno y cuatro años de edad, cada año [3].

### **Origen**

En contaminación atmosférica se reconoce como partícula a cualquier material sólido o líquido con un diámetro que oscila entre 0.0002 y 500 micrómetros ( $\mu m$ ). En conjunto se designan como partículas suspendidas totales o PST.

Las fuentes de emisión de partículas pueden ser naturales o antropogénicas. Entre las fuentes naturales se encuentran: erosión del suelo, material biológico fraccionado, erupciones volcánicas, incendios forestales, etc. Entre las fuentes antropogénicas se encuentran: combustión de productos derivados del petróleo, quemas en campos agrícolas y diversos procesos industriales.

En la Ciudad de México las principales fuentes antropogénicas son los procesos de combustión interna de vehículos automotores, la industria de la construcción, la formación fotoquímica de aerosoles con contenido de nitrato y sulfato. Durante la época de estiaje la fuente principal de partículas son las tolvaneras.

### **Elementos que las constituyen.**

Las partículas pueden tener una composición fisicoquímica homogénea o estar constituidas por diversos compuestos orgánicos e inorgánicos. Entre los componentes orgánicos se encuentran: fenoles, ácidos, alcoholes y material biológico (polen, protozoarios, bacterias, virus, hongos, esporas y algas). Entre los compuestos inorgánicos se encuentran nitratos, sulfatos, polímeros, silicatos, metales pesados (fierro, plomo, manganeso, zinc o vanadio) y elementos derivados de pesticidas y plaguicidas.

### **Clasificación**

Las partículas se clasifican de acuerdo con su efecto en la salud humana, como producto derivado de un proceso natural o antropogénico y por sus características físicas.

#### ***· Efectos en la salud humana***

**Partículas sedimentables (>10 µm).**- Son partículas que por su peso tienden a precipitarse con facilidad, razón por lo cual permanecen suspendidas en el aire en períodos cortos de tiempo. Por lo general no representan riesgos significativos a la salud humana.

**Partículas menores a 10 micrómetros - PM10 (<= 10 µm).**- Son partículas de diámetro aerodinámico equivalente o menor a 10 µm. Se consideran perjudiciales para la salud debido a que no son retenidas por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio.

**Partículas menores a 2.5 micrómetros - PM2.5 (<= 2.5 µm).**- Son partículas de diámetro aerodinámico equivalente o menor a 2.5 µm. Representan un mayor riesgo para salud humana, puede ser un factor de muerte prematura en la población.

· ***Producto derivado de un proceso natural o antropogénico***

1. **Polvos.**- Son partículas sólidas pequeñas (de 1 a 1,000  $\mu\text{m}$ ), se forman por fragmentación en procesos de molienda, cribado, explosiones y erosión del suelo. Se mantienen en suspensión y se desplazan mediante corrientes de aire.
2. **Humo.**- Son partículas sólidas finas que resultan de la combustión incompleta de materiales orgánicos como carbón, madera y tabaco. Su diámetro oscila en el intervalo de 0.5 a 1  $\mu\text{m}$ .
3. **Fumos.**- Son partículas sólidas finas. Se forman por la condensación de los vapores originados en procesos de sublimación, destilación, calcinación y fundición. Miden entre 0.03 y 0.3  $\mu\text{m}$ .
4. **Cenizas volantes.**- Son partículas finas no combustibles que provienen de la combustión del carbón. Su tamaño oscila entre 1 y 1,000  $\mu\text{m}$ . Entre sus componentes se encuentran sustancias inorgánicas de metales, óxidos de silicio, aluminio, fierro y calcio. Al depositarse en superficies actúan como abrasivos.
5. **Niebla.**- Son gotas pequeñas que se forman por condensación de un vapor, dispersión de un líquido o como producto de una reacción química. Miden entre 0.0002 y 10  $\mu\text{m}$ .
6. **Aerosoles.**- Un aerosol ambiental es una suspensión en el aire de partículas finas líquidas o sólidas. Se dividen en aerosoles primarios y secundarios. Los primarios son partículas relativamente estables que se emite directamente a la atmósfera, mientras que los secundarios son partículas que se forman en procesos de conversión de gas a partícula. Miden entre 0.01 y 100  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Los aerosoles de diámetro de 0.01 a 0.1  $\mu\text{m}$  se conocen como “partículas ultrafinas”. Estos son productos de la nucleación homogénea de vapores supersaturados ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$  y productos de la combustión).

Los aerosoles de diámetro entre 0.1 y 2.5  $\mu\text{m}$ , se conocen como “partículas finas”. Son formados en la coagulación de partículas ultra finas, a través de procesos de conversión - gas a partícula - conocido como nucleación heterogénea y por condensación de gases. La

mayor parte de los elementos que componen estas partículas en países industrializados son: sulfatos ( $\text{SO}_4$ ), nitratos ( $\text{NO}_3$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), carbón elemental y carbón orgánico. También contienen una variedad de elementos metálicos que provienen de procesos de combustión.

Los aerosoles que contienen sulfatos y nitratos, reaccionan con las moléculas de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) dispersas en el ambiente, en forma de lluvia, niebla, nieve o rocío, para formar ácidos. Este fenómeno se reconoce como *lluvia ácida*, el cual afecta gravemente a los ecosistemas [1].

#### • Características Físicas

**Velocidad de sedimentación.-** De acuerdo con esta propiedad, las partículas se clasifican en suspendidas (su tamaño oscila entre  $0.0002 \mu\text{m}$  y  $10 \mu\text{m}$ ) y sedimentables (tamaño superior a  $10 \mu\text{m}$ ).

La velocidad de sedimentación de las partículas con tamaño menor o igual a  $1 \mu\text{m}$  depende de sus propiedades de adsorción, absorción y adhesión. Cuando se comportan como gases permanecen largos períodos de tiempo en suspensión. Las partículas con tamaño menor a  $0.1 \mu\text{m}$  son propensas a chocar entre si (efecto del movimiento browniano) y adherirse, lo que favorece su sedimentación.

#### Impacto al ambiente

##### • Visibilidad

La visibilidad es la distancia en la cual un objeto puede ser percibido contra el cielo como horizonte sin una distinción exacta de sus detalles. En regiones donde la concentración de partículas fluctúa alrededor de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la visibilidad media es de 50 a 60 km. Por el contrario las áreas urbanas donde la concentración de partículas excede los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , la visibilidad promedio se reduce a 8 ó 10 km. Cuando se produce el smog fotoquímico, las partículas duplican su concentración y la visibilidad se reduce a 5 ó 7 km.

La reducción de la visibilidad es una de las pruebas más evidentes del aumento de contaminación por partículas. En la Ciudad de México la visibilidad promedio en enero de

1937 era de 10 a 15 Km y al principio de la década de los años 70 disminuyó entre 2 y 4 Km [4].

- **Clima**

Las partículas reflejan y absorben parte de la energía solar, lo cual provoca un decremento de la temperatura en algunas regiones del planeta.

- **Materiales**

Las partículas actúan como catalizadores sobre superficies metálicas, favoreciendo su oxidación. Además pueden absorber gases como los óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, los cuales reaccionan con la humedad del entorno y forman partículas de ácido sulfúrico o nítrico. Estos ácidos corroen los materiales de construcción de edificios y monumentos, los cuales constituyen el patrimonio histórico de la humanidad (lluvia ácida).

- **Ecosistema**

Las partículas y otros contaminantes del aire son causantes de la alteración de los elementos típicos del suelo y propiedades fisicoquímicas del agua. Intervienen significativamente en la formación del fenómeno de lluvia ácida, su impacto en la biosfera es determinado por el grado de toxicidad y contenido orgánico de las mismas.

### **Riesgos a la salud**

El riesgo a la salud por partículas lo constituyen su concentración en el aire y el tiempo de exposición; sin embargo, el tamaño es la característica física más importante para determinar su toxicidad y efectos en la salud humana.

Las partículas mayores a 10  $\mu\text{m}$  son retenidas básicamente en las vías respiratorias superiores y eliminadas en su mayor parte por el sistema de limpieza natural del tracto respiratorio, por lo que no son consideradas significativamente dañinas para la salud, sin embargo la exposición continua a altas concentraciones puede causar irritación de garganta y mucosas.

Por su parte, las  $PM_{10}$  (fracción respirable) no son retenidas en las vías respiratorias superiores, cerca de un tercio penetra hasta los pulmones. Su efecto depende de su composición química, pueden producir irritación de las vías respiratorias, agravar el asma y favorecer las enfermedades cardiovasculares. Se relacionan con la enfermedad de los pulmones negros en mineros, silicosis y asbestosis. En el corto plazo la contaminación por  $PM_{10}$  puede causar el deterioro de la función respiratoria. En el largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, el cáncer o la muerte prematura. De acuerdo con estudios realizados en México, se estima que el riesgo de morir prematuramente se incrementa en 2% por cada incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{10}$ . La combinación de partículas suspendidas y óxidos de azufre tienen un efecto en la salud sinérgico [4].

Los grupos de la población con mayor susceptibilidad a los efectos de las partículas incluyen a los niños, ancianos, personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares previas, fumadores y personas que respiran por la boca

El riesgo asociado con las partículas que se depositan en los pulmones es mayor en comparación del depósito en la garganta. Los estudios recientes demuestran que las  $PM_{2.5}$  tienen la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo, incrementando el riesgo de padecer enfermedades crónicas cardiovasculares y muerte prematura.

La **Norma Oficial Mexicana de PST** establece como límite de protección a la salud una concentración de  $260 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas y  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  media aritmética anual para proteger a la población susceptible.[5]

La **Norma Oficial Mexicana de  $PM_{10}$** , establece como límite de protección a la salud una concentración de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  media aritmética anual para proteger a la población susceptible. Los efectos de  $PM_{10}$  en la salud son motivo de amplias discusiones para reformular las normas, dado que en concentraciones bajas ( $30$  a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) hay un incremento en la demanda de atención médica por padecimientos crónicos respiratorios y aumento de muertes prematuras [6].

El proyecto de **Norma Oficial Mexicana de PM2.5**, propone una concentración de 65  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio de 24 horas y 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  media aritmética anual. Su aplicación es de carácter nacional [6].

## **1.2 La Contaminación del aire en México**

### **1.2.1 Antecedentes.**

En el año de 1994, el gobierno federal estableció normas de concentraciones de los contaminantes atmosféricos, con el objeto de proporcionar un margen adecuado de seguridad en la protección de la salud de la población en general y de los grupos de mayor susceptibilidad en particular. En su diseño, no se tomaron en cuenta como factores determinantes los aspectos económicos y tecnológicos. Las normas vigentes de calidad del aire fueron publicadas por la Secretaría de Salud en el Diario Oficial de la Federación del 23 de Diciembre de 1994.

Las normas de calidad del aire, fijan valores máximos permisibles de concentración de los contaminantes comúnmente presentes en las áreas urbanas. Cuando se elaboraron las normas, en México no existían los recursos ni la infraestructura para realizar estudios epidemiológicos, toxicológicos y de exposición, ni en animales, ni en seres humanos, por lo que las normas se establecieron fundamentalmente tomando en cuenta los criterios y estándares adoptados en otros países del mundo. Actualmente la Secretaría de Salud de México, realiza estudios epidemiológicos que valoran la relación dosis/respuesta, entre los diferentes contaminantes y la salud de la población en algunas zonas del país, y se revisan las normas de ozono y partículas suspendidas. Para el primero, tiene elaborado un proyecto de actualización de su norma que contempla un nuevo límite de exposición de 8 horas, adicional al vigente de 1 hora [3].

A continuación, se resumen las Normas Oficiales Mexicanas vigentes para evaluar la calidad del aire en el ambiente con respecto a ozono ( $\text{O}_3$ ), bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), bióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ) y plomo (Pb).

Tabla 1. Valores normados para los contaminantes del aire en México

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica (Para protección de la salud de la población susceptible)	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable		
Ozono (O <sub>3</sub> )	0.11 ppm (1 Hora)	1 vez cada 3 años	-	NOM-020-SSA1-1993
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 Horas)	1 vez al año	-	NOM-021-SSA1-1993
Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	0.13 ppm (24 Horas)	1 vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)	NOM-022-SSA1-1993
Bióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.21 ppm (1 Hora)	1 vez al año	-	NOM-023-SSA1-1993
Partículas suspendidas totales (PST)	260 µg/m <sup>3</sup> (24 Horas)	1 vez al año	75 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)	NOM-024-SSA1-1993
Partículas menores a 10µm (PM10)	150 µg/m <sup>3</sup> (24 Horas)	1 vez al año	50 µg/m <sup>3</sup> (media aritmética anual)	NOM-025-SSA1-1993
Plomo (Pb)	-	-	1.5 µg/m <sup>3</sup> (prom. arit. en 3 meses)	NOM-026-SSA1-1993

Fuente: Diario Oficial de la Federación del 23 de diciembre de 1994.

En nuestro país la Secretaría de Salud se encuentra actualmente revisando la normatividad sobre ozono y sobre partículas para determinar la conveniencia de modificar las normas actuales y/o de introducir nuevos estándares para PM<sub>2.5</sub> en México.

Aunadas a las Normas de Calidad del Aire, se encuentran los elementos más importantes que deben analizarse como parte de una gestión de la calidad del aire integral. Estos elementos proporcionan un marco adecuado para entender la relación que guarda el monitoreo del aire con las normas de la calidad del aire, de fuentes fijas, fuentes móviles, calidad de combustibles e inventarios de emisiones con las características demográficas y económicas de las ciudades [1].

### 1.2.2 Legislación y Normatividad en México.

En materia de normatividad de aire, en nuestro país se cuenta con varios instrumentos jurídicos que permiten prevenir y controlar la contaminación del aire, los instrumentos se resumen en Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, el Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica y las normas para el control de los niveles de emisiones de contaminantes a la



atmósfera provenientes de fuentes determinadas. Estos instrumentos, de manera sintetizada son:

### **1.2.3 Calidad del aire en las principales ciudades de México.**

De las ciudades aquí citadas, algunas son áreas metropolitanas densamente pobladas como es el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) y la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), que cuentan con más de tres millones de habitantes; y algunas otras ciudades medias como Toluca, Tijuana, Mexicali, Ciudad Juárez, que tienen una población de alrededor de un millón de habitantes.

El inventario de emisiones es un instrumento estratégico de gestión ambiental, ya que permite identificar quienes son los agentes productores de contaminación y evaluar el peso específico de cada uno de los sectores. En términos generales, existe una relación entre el volumen de emisión de contaminantes y la calidad del aire en una cuenca atmosférica. Sin embargo, debemos tomar en cuenta que en las grandes ciudades pueden presentarse variaciones bruscas en los niveles de contaminación de un día a otro, debido principalmente a cambios en las condiciones meteorológicas más que a cambios significativos en la emisión diaria de contaminantes.

En conjunto, en la ZMVM se emiten 3.1 millones de toneladas de contaminantes al año, le sigue Monterrey con casi 2 millones, Guadalajara con 1.4 millones, Cd. Juárez con un poco más de 600 mil y Toluca con casi medio millón de toneladas anuales. En términos relativos, la participación de la industria y los servicios en la ZMVM es de 10% de las emisiones, en Monterrey y Toluca es de 7%, en Guadalajara y Cd. Juárez de 5%. La contribución del sector transporte es en Cd. Juárez de casi el 90%, en la ciudad de México del 85%, en Guadalajara del 75%, en Toluca del 70% y en Monterrey del 50% [3].

En estas ciudades existe, por lo general, un mayor aporte de emisiones por el sector transporte, y como resultado de las peculiaridades de cada ciudad, una mayor o menor participación de la industria y los servicios, dependiendo de sus procesos urbano-industriales. Así mismo, con base en los inventarios detallados de la Ciudad de México,

Guadalajara, Monterrey, Toluca y Ciudad Juárez, es posible observar que los vehículos particulares son muy numerosos y representan la fuente de emisión más importante en esos centros urbanos, reflejando con ello el potencial que existe para la ejecución de programas de transporte masivo no contaminante y la importancia que tienen los programas de verificación vehicular como un medio para reducir sus emisiones.

En cuanto al porcentaje, número de días y por ciento de muestreos en que se rebasan las normas de calidad del aire, en las 7 principales ciudades del país puede considerarse que el problema de la contaminación del aire sigue siendo grave tanto en la ZMVM como en la ZMG, mientras que en la ZMM, la situación es menos severa; cabe mencionar que también se presenta una situación preocupante en Mexicali.

Las mayores frecuencias de excedencias a las normas para cualquiera de los contaminantes durante 1998 fueron del orden del 92% y de 83% para 1999, de los días en la ZMVM, del 58% y 43% para 1998 y 1999 respectivamente, en la ZMG, del 27% y 30% en Mexicali, del 10% y del 30% en la ZMM, del 10% y 8% en Cd. Juárez y del 19% y 21% en la ZMVT, principalmente [3].

Los contaminantes siguen un patrón de comportamiento similar, ya que para el ozono la ZMVM presenta el mayor porcentaje de violaciones a la norma (88% y 82% de los días), seguida de Guadalajara (40% y 16%). En el caso de las  $PM_{10}$  el mayor porcentaje de excedencias a la norma se dio en la ZMVM con un 53% y 6% de los días, y en segundo lugar Mexicali con 27% de los muestreos realizados, seguido de Ciudad Juárez con 13% y 16%. Para el monóxido de carbono, el mayor problema lo presentó Mexicali con 21% de los días fuera de norma, seguido de Cd. Juárez con 60% y 3% y Guadalajara con 4% y 2%. Aquí es importante señalar que dos de estas ciudades tienen menos de un millón y medio de habitantes y que son ciudades fronterizas, lo que pudiera reflejar que el parque vehicular es obsoleto y los programas de verificación no son eficientes o no se cuenta con ellos. El bióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno no presentan valores altos en general. La ZMVM registró un 9% y un 5% de los días con violaciones a la norma de bióxido de nitrógeno. Por otra parte es importante mencionar que varias de las ciudades en donde se miden las PST,  $PM_{10}$  y  $SO_2$  presentan incumplimiento en sus normas anuales, lo cual indica

la necesidad de enfocar esfuerzos particulares para controlar las fuentes de emisión que las producen.

De la misma manera, en el resto del mundo se sufre del mismo problema, estudios recientes han reportado diversas fuentes principales así como las partículas presentes. Un ejemplo de ello se presentó en el año 2007, en el cual De Souza realizó un estudio de la caracterización de partículas atmosféricas presentes en aerosoles en la Región Metropolitana de Vitória (VMR), Brasil [7]. Ésta se llevo a cabo mediante difracción de rayos X, espectroscopía Mössbauer y análisis termogravimétricos. Uno de los principales objetivos del monitoreo y control de los contaminantes del aire es identificar las fuentes contaminantes y encontrar la manera económicamente factible para reducir los impactos.

Los difractogramas de rayos X mostraron la presencia de halita, caolinita,  $\text{FeZnO}_2$ , cuarzo, calcita, pirita, magemita y magnetita; mientras que los análisis TDA/TG identificaron un grado de humedad, combustión de carbón, combustión de coque, caolinita, mullita y hematita la cual presentó una cantidad promedio muy elevada. Sin embargo, la presencia de hemetita en  $\text{PM}_{10}$  disminuyó después de 1998, probablemente porque fue en este año en el que se comenzó a instalar precipitadores electrostáticos en algunas industrias en VMR.

#### **1.2.4 Contaminación en espacios cerrados**

Del mismo modo, la contaminación en espacios cerrados ha alcanzado niveles alarmantes, representando una de las causas de muerte en los lugares de trabajo.

En relación a esto se han llevado a cabo numerosos estudios en diferentes partes de Europa [8,9] y Asia, tales como India y China, donde ya se comenzó con diferentes diseños y modificaciones a los sistemas de monitoreo y purificación de aire en espacios cerrados en lugares de trabajo [10]. Tal es el caso de Lituania, donde se realizó una investigación sobre la situación de los problemas de aire dentro de los espacios laborales. En éste se reportó que en el año de 1992, el 5% del total de los trabajadores del país, es decir, alrededor de 90, 000 de ellos estaban expuestos en sus trabajos a contaminantes químicos, incluyendo metales tóxicos, pesticidas, cancerígenos, entre otros. En 1996 el número total de decesos ocupacionales fue de 269, 9.4% de ellos fueron causados por afecciones en el sistema respiratorio y un 13.8% del total fueron causados por diversos agentes químicos y

aerosoles. Por lo que con base en esto se decidió implementar dispositivos de control y eliminación de dichos contaminantes para mejorar las condiciones de trabajo [11].

De la misma manera se realizó un estudio en la India acerca de los principales contaminantes fuera y dentro de las casas habitación de un área rural. Se llevó a cabo en cinco diferentes áreas cercanas al Taj Mahal, donde se monitoreó CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y partículas PM<sub>10</sub>, esto con la finalidad de determinar la relación que existe entre los contaminantes del exterior y la influencia en la calidad de aire de las casas de los habitantes de esa área en la India. Los resultados de esta investigación concluyeron que sí existe una relación directa entre el nivel de contaminación del área en este problema [12].

Debido a estos resultados, ha surgido la necesidad de realizar más estudios sobre la manera de erradicar o bien disminuir dichos contaminantes. En relación a esto, en 2006, Alvin C.K. Lai realizó una investigación en una cámara de prueba, donde analizó el efecto de las fuerzas electrostáticas, misma que es comúnmente ignorada como factor en muchos estudios del aire de casas habitación. El estudio se llevó a cabo en una cámara de 1.8 m<sup>3</sup>, diseñada para estudiar el depósito de partículas bajo la influencia de fuerzas electrostáticas. Las superficies bajo prueba fueron una hoja de acetato, un plato de vidrio y una placa con una fina película de cobre. Así mismo, se realizaron otras pruebas con las mismas superficies, dándoles tratamiento con un spray comercial antielectrostático. Los resultados revelaron que la velocidad de depósito sobre la hoja de acetato fue significativamente mayor que en las superficies de vidrio y cobre, concluyendo con esto que las fuerzas electrostáticas deben ser tomadas en cuenta como un factor importante. Por otro lado, se observó que el depósito disminuyó radicalmente al aplicar el spray, disminuyendo hasta en un 93% en la hoja de acetato y en un 68% para el vidrio y el cobre [13].

En particular en la Ciudad de México se lograron obtener algunos depósitos sobre un purificador comercial en distintas secciones de una planta de Galvanoplastia, los cuales están en proceso de ser analizados por espectroscopía de infrarrojo, y difracción de rayos X. se obtuvieron micrografías directamente de las placas del precipitador, en ellas se puede observar diversidad en los tamaños de las partículas depositadas en él, tales como partículas PM<sub>2.5</sub>. Del mismo modo se puede observar la formación de cúmulos de las partículas

presentando incluso diferente coloración, debido a los diferentes compuestos procedentes de dichos baños y cristalizados en las placas del precipitador (Anexo I).

En México las normas que rigen la contaminación en espacios cerrados son: NOM-010-STPS-1999; NOM-011-STPS-2001; NOM-028-STPS-2004; entre otras; las cuales establecen las precauciones y los límites permisibles para la exposición de los trabajadores con diferentes sustancias químicas.

Debido a lo anterior; se han venido desarrollando técnicas para la descontaminación de aire. A continuación se hace una breve descripción de éstas; profundizando un poco más en la Precipitación Electrostática, siendo ésta la utilizada para el desarrollo de este proyecto.

### **1.3 Técnicas de control para la separación de partículas en aire.**

Las técnicas de control consideran principalmente el tamaño y peso de las partículas, mientras que, para los gases, intervienen fundamentalmente sus características químicas [14].

#### **1.- Por gravedad.**

Es el mecanismo natural más importante de remoción de partículas. Se emplea para sólidos y líquidos con tamaños  $\geq 50\mu\text{m}$  que se sedimenten fácilmente al disminuir la velocidad de la corriente gaseosa. Operan de manera similar a los sedimentadores de agua, es decir, presentan un aumento de área transversal al paso del fluido con el objeto de disminuir la componente horizontal de la velocidad y permitir que la componente vertical haga posible la sedimentación de la partícula.

Su ventaja principal es que presenta baja pérdida de carga, el diseño y mantenimiento son relativamente sencillos; la principal desventaja es la baja eficiencia que presenta, un poco superior al 50% en peso, y el gran espacio que requiere.

#### **2.- Por Inercia.**

Estos equipos se basan en la modificación brusca de la línea de corriente. La más común es la cámara de persianas. Su eficiencia no es muy alta pero su costo tampoco.

### 3.- Por Fuerza Centrífuga.

Debido a que las fuerzas centrífugas se pueden generar son mayores que las de la gravedad, con este método se logra retener partículas de menor tamaño. Los dispositivos que emplea, este mecanismo son los ciclones y los precipitadores dinámicos.

### 4.- Por Intercepción.

Este tipo de mecanismo se basa en la colisión de la partícula con un obstáculo en tal forma que son retenidas. Existen dos grandes grupos que emplean este método de separación: los lavadores y los filtros.

En los lavadores se introduce un líquido que puede ser agua o una solución reactiva por aspersión o por derrame. En general no retienen partículas inferiores a  $1\mu\text{m}$ . Un ejemplo son los lavadores húmedos, que son sistemas muy eficientes pero caros. Los lavadores se aplican especialmente para gases calientes y húmedos cuando la altura de la pluma no es el factor limitante. Los colectores húmedos más empleados son las torres de aspersión, el lavador ciclónico y el lavador Ventura.

En la filtración se conduce la corriente gaseosa a través de un filtro de papel o de tela que permite el paso del aire pero no el de las partículas. Inicialmente, las partículas pequeñas son retenidas por intersección, difusión, impacto inercial, atracción electrostática o sedimentación, pero una vez que el polvo retenido forma una capa sobre el filtro la eficiencia se debe, básicamente, al cribado. Remueven comúnmente partículas de  $0.5\text{ mm}$  e incluso de  $0.1\mu\text{m}$ .

### 5.- Deposición ultrasónica.

Los ultrasonidos favorecen la colisión y aglomeración de las partículas pequeñas. No es propiamente un proceso de separación sino un mecanismo auxiliar.

### 6.- Precipitación Electroestática.

La separación se efectúa aprovechando la capacidad de ionización de los compuestos en un campo eléctrico que los desvía y obliga a adherirse a uno de los electrodos. Este proceso se puede efectuar tanto para gas seco como para húmedo. Los precipitadores electrostáticos se dividen en dos grupos: de bajo voltaje con dos etapas y de

alto voltaje con solo una. Los primeros operan entre 6 000 y 12 000 Voltios y se emplean para acondicionamiento del aire en hospitales y comercios. Los precipitadores de alto voltaje operan entre 30 000 y 100 000 Voltios y se utilizan en las industrias.

#### **1.4 Precipitadores Electrostáticos**

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos que se utilizan para atrapar partículas a través de su ionización. Se emplean para reducir la contaminación atmosférica producida por humos y otros desechos industriales gaseosos, especialmente en las plantas que funcionan en base a combustibles fósiles.

Un precipitador electrostático (ESP, por sus siglas en inglés), o un filtro de aire electrostático es un dispositivo que remueve partículas de un gas que fluye (como el aire) usando la fuerza de una carga electrostática inducida.

Los precipitadores electrostáticos son dispositivos de filtración altamente eficientes, que impiden mínimamente el flujo de los gases a través del dispositivo, y pueden remover fácilmente finas partículas como polvo y humo de la corriente de aire.

La precipitación electrostática remueve las partículas de los gases de combustión de los procesos, por medio de las siguientes etapas de proceso:

- Ionización: carga de partículas.
- Migración: transporte de las partículas cargadas a la superficie.
- Recolección: precipitación de las partículas cargadas sobre las superficies colectoras.
- Disipación de la carga: neutralización de las partículas en las superficies colectoras.
- Desalojo de partículas de las superficies colectoras al recipiente acumulador.
- Transporte de las partículas desde el recipiente acumulador hasta el punto de desecho [15].

El precipitador más básico contiene una fila de alambres finos, seguido por pilas de placas planas de metal espaciadas aproximadamente 1 centímetro. La corriente de aire pasa a través de los espacios entre los alambres y después atraviesa el apilado de placas [16].

En este tipo de precipitadores, para nivel industrial, la distancia a la placa es de poco menos de 10 cm. Con una diferencia de voltaje de 40 kV, se supondría una intensidad del campo de 40 kV/0.1 m; es decir, una intensidad del campo eléctrico cerca de la placa de 400 kV/m. Sin embargo, todo el flujo eléctrico que proviene de los alambres, y el área superficial de éstos es mucho menor que la de la placa. Por lo tanto, por el principio de conservación de la carga, el potencial impulsor cerca de los alambres debe ser mucho mayor. Para los precipitadores electrostáticos domésticos, el voltaje utilizado oscila entre los 8 y los 10 V para las placas y de los 8 a los 17 V para los alambres.

La manera de ionización de las partículas se da por adhesión de carga negativa en la superficie de éstas. Es decir; una fuente de poder transfiere electrones de las placas hacia los alambres, desarrollando una carga negativa en los alambres, relativa a la carga positiva de las placas. Los electrones emigran alejándose del alambre, hacia la placa; y una vez que se alejan lo suficiente del alambre de tal modo que la intensidad del campo sea demasiado baja como para acelerarlos hasta el punto en que puedan ionizar partículas, deja de existir la corona visible y sencillamente fluyen como electrones libres.

A medida que los electrones fluyen hacia la placa, encuentran partículas y pueden ser capturados por ellas, cargándolas de este modo. Entonces, el mismo campo eléctrico que creó los electrones y que los impulsó hacia la placa también impulsa las partículas cargadas hacia ésta [2].

Una vez que las partículas están en contacto con la placa positiva, entonces ceden sus electrones y se convierten en partículas cargadas positivamente como la placa, y comienzan a actuar así como parte del colector. Debido a este mecanismo, los precipitadores electrostáticos pueden tolerar grandes cantidades de acumulación de residuo en las placas de recolección y seguir funcionando eficientemente, puesto que la materia por sí misma ayuda a recolectar más materia de la corriente de aire. Esto puede ser apreciado en la Figura 1.



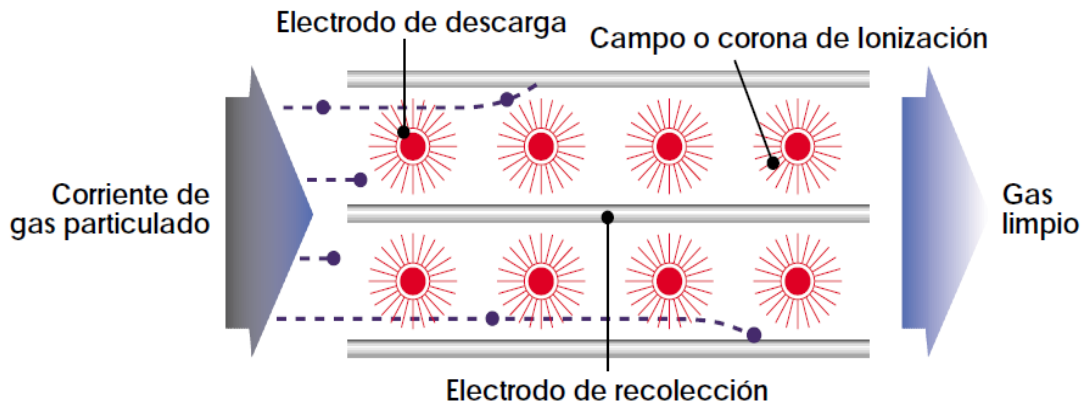


Figura 1. Vista superior del funcionamiento de un precipitador electrostático [15].

La eficiencia del precipitador usualmente disminuye una vez que se haya formado en las placas una acumulación muy pesada de material. La acumulación puede llegar a ser bastante pesada como para bloquear la circulación de aire, o puede ser bastante densa como para ocasionar un corto circuito al permitir que la corriente atraviese el aislamiento [16].

Se aplican incluso para partículas inferiores a  $1\mu\text{m}$  con muy buenos rendimientos. Pueden tratar un flujo de gas entre 25 y  $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ , tienen una pérdida de carga baja y pueden operar por periodos prolongados con relativamente poco mantenimiento. Se pueden emplear para nieblas ácidas pero no para gases explosivos. Entre sus inconvenientes se tiene que algunas clases de polvos aíslan la superficie y disminuyen el rendimiento, tienen un costo de instalación elevado y son sensibles a los cambios de temperatura.

Dentro de sus principales ventajas es que se puede obtener una eficiencia superior al 99%, colecta partículas muy pequeñas y puede operar a temperaturas elevadas ( $350\text{ }^\circ\text{C}$  a  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ). Sin embargo, presenta un costo de instalación elevado y presenta peligro por alto voltaje [14].

#### 1.4.1 Diferentes diseños de precipitadores.

Los ESPs continúan siendo dispositivos excelentes para el control de muchas emisiones de partículas industriales, incluyendo el humo de instalaciones de generación eléctrica (alimentados por carbón o aceite), recolección de torta salina de los calentadores de licor negro en las plantas de pulpa de celulosa y recolección del catalizador de las unidades de conversión catalítica de lecho fluidizado en las refinerías, por nombrar algunos.

Estos dispositivos tratan volúmenes de gas de varios cientos de miles de ACMM (metros cúbicos por minuto actuales, por sus siglas en inglés) a 750 millones de ACMM en las aplicaciones de caldera más grandes (alimentadas por carbón) [16].

La placa paralela original - el diseño cargado del alambre ha evolucionado a medida que nuevos diseños del electrodo de descarga más eficientes han sido desarrollados. Hoy en día estos desarrollos se han concentrado en electrodos de descarga rígida a los que se adhieren muchas púas puntiagudas, maximizando la producción de la corona. Los sistemas de transformación - rectificación aplican voltajes de 50-100 kilovoltios en las densidades relativamente de gran intensidad. Los controles modernos reducen al mínimo el chisporroteo y previenen la formación de arcos, evitando daño a los componentes. Los sistemas automáticos de golpeo y los sistemas de la evacuación de la tolva quitan la materia de partículas recogida mientras que están en línea, permitiendo que los ESPs permanezcan en funcionamiento por años.

Con el objetivo de ofrecer soluciones al problema de las partículas suspendidas en el aire en espacios cerrados, se han llevado a cabo estudios para el diseño y optimización de sistemas de purificación del mismo. Por ejemplo, en 1992 se realizó un estudio sobre los diferentes tipos de partículas, como aerosoles biológicos, polen utilizando un sistema de purificación comercial, variando la velocidad de flujo de aire, considerándolo como flujo pistón y obteniendo así una mayor eficiencia al aumentar éste último [17]. Waring, et al; en 2008 hicieron un estudio de cinco diferentes purificadores portátiles en donde se determinó la eficiencia, determinada por la velocidad de depósito de las partículas en función del diámetro de éstas, obteniendo una eficiencia aproximada del 60%. La eficiencia esperada era superior al 90%. Sin embargo, se atribuyó a la falta de corrientes o movimiento de la masa de aire dentro de la cámara de prueba [18]. Para erradicar este tipo de errores, se han hecho modelaciones y simulaciones tomando en cuenta todas estas variables, tanto el flujo, la velocidad de éste y las fuerzas eléctricas que intervienen en los precipitadores electrostáticos [19,20]; considerando la naturaleza de las partículas que se pretende recolectar y la fuente de donde provengan [21]; así como la relación que existe entre la densidad del polvo y la capacidad de recolección de los platos o electrodos [22].

Así mismo, se han desarrollado diferentes tipos de purificadores utilizando fotocatalisis con la finalidad de precipitar las partículas suspendidas y a la vez degradar los contaminantes. El catalizador más utilizado es el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ). Takeshi Kudo et al. lograron sintetizar una columna rectangular de  $\text{TiO}_2$  soportado en un núcleo de hojas de sílice para el desarrollo de un efectivo sistema de purificación de aire [23].

Por otra parte, el arreglo de los electrodos en un precipitador electrostático, así como el voltaje aplicado es de gran importancia. Existe en la literatura artículos donde se recomienda un arreglo de los electrodos iguales en dimensiones, uno conectado a la tierra y aplicando un voltaje al otro electrodo, incluso con propelas de níquel (Fig. 2) [24], mientras que otros utilizan dos platos colectores conectados a tierra y un alambre de acero equidistante a éstos y perpendicular al flujo, el cual se conecta a una fuente de poder aplicando un voltaje de aproximadamente 30 kV. Estas condiciones fueron reportadas en un estudio publicado en 2008 por J. Podlinski y colaboradores en una cámara de acrílico con un volumen de  $200 \text{ dm}^3$  acoplados a otros dispositivos para lograr evaluar la cantidad de depósito en función a la densidad de las partículas de humo de cigarro introducidas al flujo, que fueron desde las generadas por 2 y hasta 14 cigarros quemados [14]. El arreglo puede apreciarse en la Figura 3.

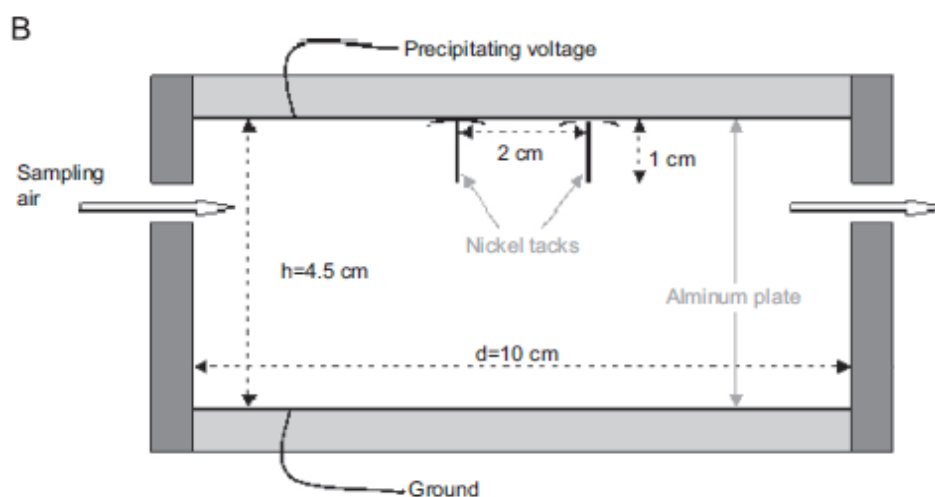


Figura 2.- Precipitador electrostático con propelas de níquel [14].

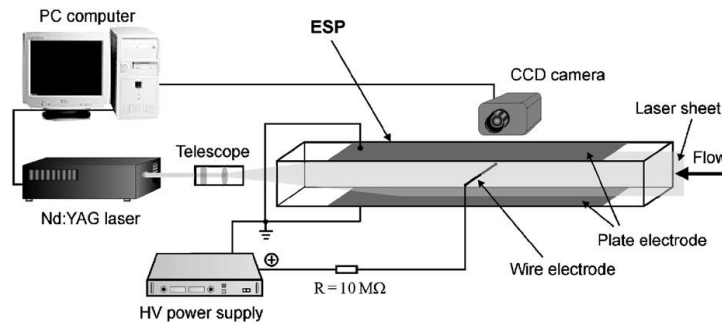


Figura 3. Arreglo de dos placas paralelas utilizado por Podlinski et al. [14].

En cuanto a la eficiencia de los precipitadores electrostáticos para partículas muy finas, de alrededor de una micra de diámetro, se tiene reportado que es relativamente baja [25]. Con el objetivo de incrementarla, se propuso un arreglo en una cámara de acrílico de 1.6m de longitud que cuenta con siete alambres de acero inoxidable de 20 cm de longitud como electrodos y dos platos colectores a la entrada y la salida del ducto; con un ventilador para lograr la velocidad de flujo deseada; esto se realizó para diferentes valores de potencial (16-32 kV) y ambas polaridades. Las partículas con las que se evaluó dicha eficiencia fueron cenizas de cigarro de 1 micra hasta 5 micras. Después de algunas pruebas, se llegó a las siguientes conclusiones: es más eficiente un flujo menor, obteniendo con ello una mayor cantidad de depósito. El comportamiento para partículas superiores a 3 micras aplicando un voltaje de 20 KV se remueve el 100% de éstas, es decir, para partículas de este tamaño no es necesario aplicar más de 20 kV. En cuanto a la inversión de polaridad, no representa cambio significativo, únicamente al aplicar el mínimo voltaje (16 kV) presenta una mayor remoción en las partículas menores a 1 micra que con la polaridad positiva; y finalmente, la remoción de las partículas más pequeñas, que era el objetivo de este estudio, comienza a ser efectiva al aplicar voltajes de 25 kV y removiendo el 100% con 32 kV [26].

#### 1.4.2 Electrodo modificado

En lo que respecta a electrodos modificados, en 2003, Kuroda y colaboradores evaluaron el efecto de la forma de cuatro diferentes electrodos de aluminio: el primero con una superficie lisa, o tipo espejo, y los otros tres con perforaciones circulares de un diámetro de 0.6, 1 y 3.1 mm en un arreglo tipo sándwich con dos placas de vidrio en los extremos y una separación de 5.5 mm entre ellos (figura. 4). El objetivo de la modificación

fue elevar las bajas eficiencias de las placas de los precipitadores en la recolección de las partículas de  $\text{NO}_x$ . Al intercambiar el efecto corona utilizado en los EPS por una barrera de descarga. La densidad de partículas fue determinada mediante un contador de partículas RION. Las conclusiones a las que se llegó fueron las siguientes: los tres electrodos con perforaciones presentaron una mayor recolección de partículas que el electrodo sin modificación, siendo el de orificios de 3.1 mm de diámetro el que presentó un mejor comportamiento [27].

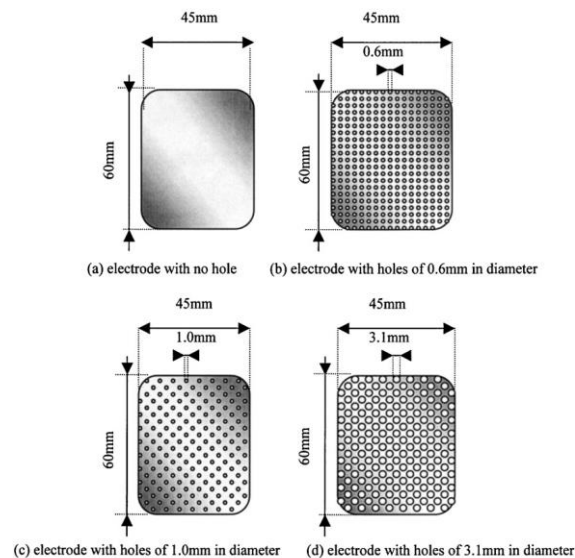


Figura 4. Electrodo modificado [28].

Respecto a la modificación superficial de los electrodos con estructura tipo ópalos inversos, y hasta donde nosotros sabemos, no existe hasta la fecha nada publicado, de aquí el interés por realizar este estudio de la modificación de la superficie de los electrodos.

## 1.5 Ópalos Inversos

Un ópalo es un arreglo ordenado de esferas (Fig. 5a); el espacio existente entre ellas puede ser ocupado por otro material, y al remover las esferas se obtiene lo que llamamos “ópalo inverso”. Una estructura con una periodicidad regular y ordenada. En la figura 5 b) se puede apreciar con una mayor claridad dicha estructura.

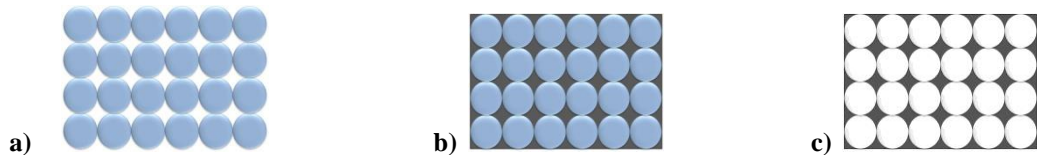


Figura 5 a) Estructura tipo ópalo, b) ópalo con recubrimiento y c) estructura tipo ópalo inverso.

La estructura tipo ópalo inverso es actualmente utilizada para la fabricación de cristales fotónicos, ya que presenta una constante dieléctrica en una escala del mismo orden de la longitud de onda de la luz visible.

Lo ópalos inversos pueden ser sintetizados vía sol-gel, depósitos químicos de vapor (CVD, por sus siglas en inglés), depósitos electroquímicos, depósito de capa atómica, nanocrystalina y conversión química. De todas estas técnicas, la electroquímica es la que promete ser la más viable, ya que permite una más completa infiltración y permite un control más fino en el espesor de la película [28].

El primer reporte de crecimiento mediante electrodepositos de zinc se realizó en el 2004 por Beatriz H. Juárez y Cefe López. Para lograr la estructura tipo ópalo inverso, se sintetizaron esferas de poliestireno y un posterior electrodeposito de zinc mediante dos diferentes técnicas, la voltametría cíclica y el electrodeposito mediante potencial pulsado de onda cuadrada, obteniendo con ésta última arreglos con un menor tamaño de poro. Sin embargo, permitió una mejor homogeneidad y mejor ordenamiento de éstos [29]. En base a lo presentado en el artículo sobre el crecimiento de los ópalos inversos de zinc, nuestro objetivo es incrementar el tamaño de los poros, y utilizar un metal diferente debido a los problemas con la corrosión que éste presenta.

Del mismo modo, en 2006 en Grenoble, Francia se realizó la síntesis de una monocapa de sílice en ópalos de poliestireno, removiéndolos posteriormente al ser calcinados, logrando así la estructura “ópalo inverso”. Se obtuvo una estructura de ópalos inversos de veinte capas de 560 nm de tamaño de poro [30]. Esta información pudiera ser útil restando únicamente el metalizado de la superficie debido a que es necesario un material conductor en la superficie, lo cual es requerido para la precipitación electrostática.

## **1.6 Depósitos metálicos.**

Existen principalmente dos métodos para la obtención de depósitos metálicos a partir de soluciones acuosas, un método usa corriente eléctrica y el otro usa un compuesto donador de electrones y es denominado electroless [31].

### **1.6.1 Depósitos Electrolíticos.**

Los depósitos por vía electrolítica hacen alusión al recubrimiento de un objeto con una capa delgada de metal mediante electricidad. Los metales para recubrimiento más comunes son: oro, plata, cromo, cobre, níquel, estaño y zinc. El objeto a ser recubierto generalmente es un metal diferente al utilizado para el recubrimiento, aunque puede ser el mismo o incluso, puede no ser un metal [32].

Desde mediados del siglo pasado las industrias de depósito vía electrolítica (industrias galvánicas), han tenido una tremenda expansión gracias a su capacidad para neutralizar las pérdidas de metales no estables por deterioro de la corrosión.

Un proceso electrolítico se basa en cambios químicos producidos por la corriente eléctrica, lo cual implica: una fuente generadora de energía continua, una cuba o reactor electrolítico, un electrolito, un ánodo y un cátodo.

El recubrimiento se lleva a cabo en el reactor donde se encuentra almacenado el electrolito (solución que tiene el metal a ser depositado en forma iónica). Una vez que la corriente eléctrica es generada por la fuente de energía continua, pasa a través del reactor, el ánodo (metal de la misma naturaleza del electrolito) comienza a aportar iones a la solución. El cátodo (objeto a ser recubierto) recibe estos iones metálicos liberando a su vez los electrones y dejando el metal en su superficie en estado metálico.

La operación de recubrimiento electrolítico incluye tres etapas básicas: preparación de la superficie, tratamiento y acabado.

La preparación de la superficie, la limpieza y la creación de condiciones químicas apropiadas en la pieza a ser tratada, son esenciales para asegurar que el recubrimiento se

comporte adecuadamente una vez que la pieza entre en uso. Si una superficie no se encuentra limpia, es muy probable que los recubrimientos no se adhieran adecuadamente a la superficie, tanto en homogeneidad como en espesor, ni tengan la apariencia deseada o la capacidad de bloquear la corrosión en ella.

Las técnicas de preparación de superficies pueden incluir desde una simple limpieza abrasiva con baños ácidos, hasta complejos procesos químicos de limpieza múltiple, lo cual dependerá del tipo de recubrimiento a realizar.

Una vez que la superficie se encuentre en condiciones óptimas para su recubrimiento se inicia el proceso de tratamiento propiamente dicho, el cual depende del uso que se le dará a la pieza.

El recubrimiento se logra utilizando un potencial eléctrico y en un cierto rango de temperaturas para facilitar el desplazamiento de los iones y aumentar la velocidad de reacción entre la superficie de la pieza y los iones depositados.

Luego del recubrimiento, es necesario realizar varias etapas claves para dar el acabado deseado a la pieza.

- Recuperador: Después del tratamiento con las sales del baño de recubrimiento, las piezas se enjuagan para limpiarlas de residuos procedentes del baño anterior.
- Enjuagues: Después de que las piezas pasan por el enjuague en tanque de agua estancada, todavía tienen residuos de las sales de recubrimiento, lo que hace necesario un nuevo enjuague en tanques de agua corriente.
- Pasivado: Una vez que la superficie se encuentran libre de sales, se llenan los poros, se elimina la posible reactividad del acabado y se dan los últimos retoques estéticos por medio de sales de cromo principalmente en baños que no requieren electricidad.
- Secado: Después tener el acabado final, las piezas se secan para eliminar el agua residual proveniente del enjuague y así, evitar que el producto salga con manchas, para luego lacar y proseguir a su embalaje y venta [25].



### 1.6.2 Depósitos Electroless

El metalizado electroless es uno de los métodos de metalizado de plásticos y materiales no conductores más empleados en la actualidad y es el único con el cual se puede obtener una superficie perfectamente homogénea y un depósito metálico uniforme sobre una superficie catalítica. Sin embargo, este es un proceso demasiado complejo donde resultan cruciales las etapas de ataque químico (acondicionamiento) y la etapa de activación.

Una de las principales ventajas que presenta este método es la ausencia de una fuente de corriente eléctrica. Sin embargo, presenta muchos inconvenientes tales como: contaminación de los baños, soluciones inestables y de corta duración, desventajas ecológicas como el uso de cromo hexavalente, entre otras [33].

El proceso para el metalizado de plásticos se constituye de siete etapas:

- Limpieza: Ésta se realiza solamente si es necesario, eliminando las posibles impurezas que pudieran estar presentes, tales como rastros de aceite, polvo o restos de material de la pieza que no fueron removidos completamente. Para ello se utilizan soluciones alcalinas o una solución de mezcla cromo-sulfúrica, mejor conocida como mezcla crómica, a baja concentración.
- Preinmersión: En esta etapa del proceso se suelen utilizar solventes que se emplean antes del ataque químico para mejorar la superficie de la pieza después de un pobre moldeo y especialmente en piezas que contienen un gran contenido de estrés. Usando preinmersión, las condiciones de ataque no uniforme se reducen mejorando de manera global la adherencia.
- Ataque químico: Usualmente se realiza con agentes oxidantes muy fuertes cuya finalidad es la de carcomer la superficie del plástico a diferentes niveles, cumpliendo de esta manera dos propósitos: incrementar área superficial, convirtiendo una superficie hidrofóbica a una hidrofílica; y proporcionar a la superficie del plástico los micro-huecos que serán los sitios de enlace para depositar el metal siendo fundamentales para que exista una buena adherencia entre el

sustrato y el metal. El atacante químico más empleado es la mezcla crómica. Esta etapa es importante en el proceso debido a que ésta será la que confiera las características físicas necesarias para que se tenga una buena adherencia y apariencia del metalizado.

- Neutralización: Esta etapa se realiza con bisulfito de sodio u otro producto que permita eliminar el exceso de atacante químico por reducción química. Aun cuando se realiza un enjuague, el atacante puede quedar atrapado en micro-hueco oculto, y si éste no es removido o reducido a cromo trivalente en su totalidad, las etapas subsecuentes se contaminan reduciendo la eficiencia del proceso.
- Activación: El propósito de los activadores es proporcionar sitios catalíticos en la superficie del plástico. Se emplean soluciones que en la mayoría de los casos contienen metales preciosos tales como paladio, platino u oro. Estas soluciones se preparan con cloruro de paladio, cloruro estañoso y ácido. De esta manera se obtiene una película de paladio, que es una solución de complejo de iones y partículas coloidales cuya actividad y estabilidad dependen de las concentraciones del ion estaño y cloruro.
- Aceleración: Después del enjuague que sigue de la etapa de activación, el paladio se encuentra presente en la superficie rodeado de hidróxido de estaño hidrolizado. El exceso de hidróxido de estaño debe ser removido de la pieza antes de que el paladio actúe como catalizador. El objetivo del acelerador es el de remover la película excedente de la pieza dejando intactos los sitios donde se encuentra el paladio para poder realizar el metalizado electroless. El mayor problema que se presenta con los aceleradores es que al contaminarse, principalmente por residuos de cromo que se arrastraron desde otras etapas del proceso, resultan altamente tóxicos.
- Metalizado electroless: finalmente las piezas se colocan en la última etapa del proceso de premetalizado; baño electroless, el cual deposita una fina película metálica, ésta se realiza normalmente con níquel o cobre, en la superficie del plástico por reducción química [33].



# CAPÍTULO II.

## JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

## **JUSTIFICACIÓN**

Debido a los problemas de salud que generan las partículas suspendidas en el aire, y las cuales se han presentado los trabajadores por la mala calidad de éste en los espacios de trabajo, incluso hasta llegar a ser la causa de muerte de muchos de ellos, resulta necesario el ofrecer alternativas para dar solución a dicho problema.

En relación a esto, una opción es la instalación de precipitadores electrostáticos en los diferentes puntos de la empresa donde sean necesarios con la finalidad de purificar de una mejor manera el aire. Una posible aplicación es en la industria de la galvanoplastia, donde es posible apreciar la mala calidad en el aire.

Un área de oportunidad se encuentra en realizar una modificación a la superficie de los electrodos con el fin de obtener una mayor eficiencia del precipitador. Las estructuras tipo ópalos inversos presentan una mayor área superficial, debido a ello, pudiera incrementar la cantidad de partículas depositadas, obteniendo así una mayor purificación del aire.

## **HIPÓTESIS**

Se pueden obtener estructuras tipo ópalos y ópalos inversos metálicos con una apertura tal que permita incrementar la capacidad de captación de partículas suspendidas en aire, para ser utilizados como electrodos en precipitadores electrostáticos domésticos.

## **OBJETIVOS**

### Objetivo General:

Obtención de estructuras tipo ópalos y ópalos inversos metálicos para ser usados como electrodos en un precipitadores electrostáticos comercial.

### Objetivos Específicos:

1. Obtención de ópalos sintéticos y el electrodeposición de metales para la obtención de estructuras de ópalos inversos.
2. Experimentación en el depósito de partículas suspendida en aire usando electrodos modificados y una placa plana.
3. Determinación de características y localización de los depósitos en estructuras de ópalos inversos y su dependencia con el tamaño e interconectividad de las estructuras.
4. Verificación de la influencia del tipo de metal usado en las estructuras tipo ópalos inversos sobre el depósito de partículas desde medio gaseoso.
5. Caracterización del depósito electrostático de partículas suspendidas en aire tanto de productos de combustión, metales en aerosol, sustancias volátiles de baños electroquímicos (arcillas, cenizas volantes, talcos, etc.) así como en una niebla suspendida por ultrasonido de una solución preparada.

# CAPÍTULO III

## DESARROLLO

## EXPERIMENTAL



## **CAPÍTULO III.- DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **3. 1.- Síntesis de las estructuras tipo ópalo y ópalos inversos metálicos.**

Se realizó la síntesis de diferentes estructuras tipo ópalo, así como el metalizado de las superficies; como carbón activado, partículas de polímero molido recubiertas con pintura de zinc y pintura de cobre.

Se siguió la técnica desarrollada en un trabajo previo en el grupo de trabajo para la obtención de los ópalos de poli(metil metacrilato), PMMA, y se adhirieron a una placa de acero inoxidable 304 por spincoating [34]. Posteriormente, se realizaron depósitos de níquel mediante una solución a base de sulfamatos.

En la búsqueda de una estructura tipo ópalo y ópalos inversos metálicos; los arreglos que cumplieron estas características fueron los siguientes:

#### 3.1.1 Estructuras tipo Ópalo Metálico

##### 3.1.1.1 Síntesis de ópalos de poliestireno molido

Se molieron pellets de poliestireno de 4 mm de longitud en un molino comercial marca Krups, tipo F408 Modelo GX4100 y se tamizaron para lograr tener una cantidad suficiente de cada tamaño. Se lograron fraccionar a tamaños de partícula desde 0.59 mm hasta 1.60 mm.

El polímero se atacó con acetona durante 24 horas, rociando ésta sobre las partículas para lograr unir las; esto se llevó a cabo en un recipiente de plástico perforado y sostenido dentro de otro usado como reservorio de acetona, la cual al vaporizarse impregnaba las partículas absorbiéndose en superficie. Con ello, las partículas se unieron entre sí sin perder su forma y, sobretodo, dejando espacios vacíos entre ellas a la vez de constituir una unidad con la forma del contenedor y suficientemente resistente para permitir su manejo sin ruptura.

Se le aplicó una capa de pintura de cobre, y posteriormente se sumergió en una solución activadora de cloruro estañoso durante 5 minutos. Ésta consta de 5 g de cloruro estañoso, 20 ml de ácido clorhídrico y 500 ml de agua destilada. Posteriormente, se le aplicó un acabado de plata mediante la Fórmula de Brashear [35,36]. Ésta consiste en poner en contacto el vidrio con una mezcla de dos soluciones:

1. La primer solución (solución A) consiste en 20 g de nitrato de plata, 10 g de hidróxido de potasio en 400 ml de agua destilada. Se forma un precipitado de color café oscuro y éste se disuelve mediante adiciones de hidróxido de amonio, agitando enérgicamente después de cada adición. Se necesitan aproximadamente 50 ml.
2. La segunda solución (solución B) consta de 90 g de sacarosa, 4 ml de ácido nítrico puro y 1 L de agua destilada. Ésta se hierve y enfría antes de usarse, pues la temperatura óptima de trabajo es de 20 °C.

Inmediatamente antes de usarse se mezcla una parte de la solución B con cuatro partes de la solución A (relación v:v). El ópalo se deja en contacto con esta mezcla durante 16 h.

#### 3.1.1.2 Síntesis de ópalos de vidrio-plata

Para la síntesis de este electrodo se utilizaron esferas de vidrio con 3 y 4 mm de diámetro para la formación de la estructura tipo ópalo. Se dio tratamiento térmico durante periodos de 3.5 h a 650 °C en un molde rectangular de acero. Para el metalizado de la superficie de la estructura se le aplicó un acabado de plata mediante la Fórmula de Brashear, descrita previamente.

#### 3.1.1.3 Síntesis de ópalos de vidrio-níquel.

Para la síntesis de éste, se partió del electrodo recubierto de plata; y posteriormente se le aplicó un electrodeposición de níquel brillante mediante una solución a base de sulfamatos con una intensidad de corriente de 0.6 A/cm<sup>2</sup> y 60 °C de temperatura durante 1.3 h [37,38]. Finalmente, se enjuagaron con agua destilada para eliminar residuos de la solución de Ni.

### 3.1.2 Síntesis de ópalos inversos de estaño.

Se fundió un bloque de estaño puro en un horno eléctrico a una temperatura de 400°C durante 3 h. Posteriormente, se vació sobre partículas de sílica-gel hidratadas, de un diámetro promedio de 3 mm, agitando manualmente para permitir que el estaño pasara a través de los espacios entre las partículas. La prueba anterior se repitió pero con las esferas deshidratadas para evitar una rápida liberación del vapor de agua, para que con ello, el estaño permaneciera más tiempo en estado líquido.

Las esferas fueron empacadas en un vaso de precipitado haciendo una columna de estaño en la parte superior y se introdujeron al horno eléctrico para que, al fundirse, el estaño pasara a través de los huecos entre las esferas. Este procedimiento permitió lograr los resultados más cercanos a lo deseado.

Finalmente, para lograr la estructura tipo ópalo inverso, se atacó con una solución ácido fluorhídrico - agua (1:1; v:v) durante 30 minutos logrando disolver las partículas de sílica gel.

### **3. 2.- Evaluación de los electrodos en un diseño de precipitador electrostático.**

Después de haber realizado pruebas con diferentes partículas suspendidas, como cenizas volantes, talco, polvo de naranja de metilo, productos de combustión y una niebla de partículas de plata, en una cámara de prueba con placas planas de latón y cobre (Anexo II), se optó por realizar la evaluación en un precipitador comercial.

Para realizar la evaluación de los electrodos, éstos se adaptaron a las placas de un purificador comercial de tres placas paralelas verticales. En dicho diseño, éstas actúan como ánodo a la vez que dos alambres fungen como cátodo. La separación entre las placas fue de 2.1 cm; al igual que la distancia entre los alambres. El voltaje aplicado a las barras oscila entre los 8.50 y 10.3 V; mientras que en los alambres va desde los 16.2 hasta aproximadamente 19 V. El diagrama de este arreglo se puede apreciar en la Figura 6.

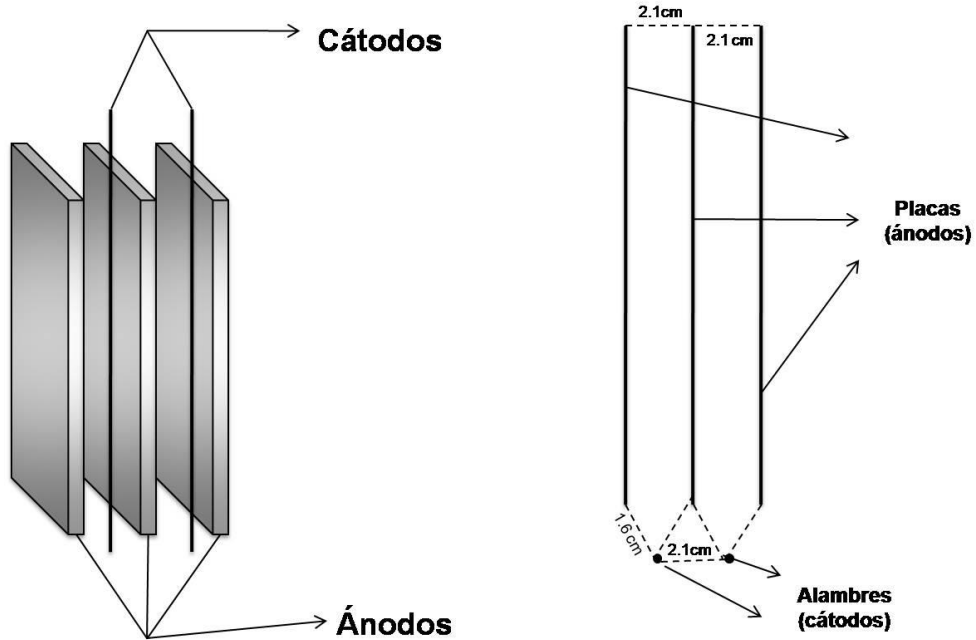


Figura 6. Diagrama del arreglo del precipitador electrostático.

Como electrodos se utilizaron una placa de acero inoxidable, las estructuras tipo ópalo metálico obtenidas, una estructura recubierta con plata, otra con níquel y la estructura tipo ópalo inverso de estaño. Se utilizó también una esponja de cobre con un volumen total de aproximadamente  $22\text{cm}^3$ , un volumen de espacios internos aproximado de  $12\text{ cm}^3$  y un espaciamiento aproximado de 2 mm. El área expuesta en primer plano es de aproximadamente  $40\text{ cm}^2$ .

En la Figura 2 se muestran los electrodos evaluados:



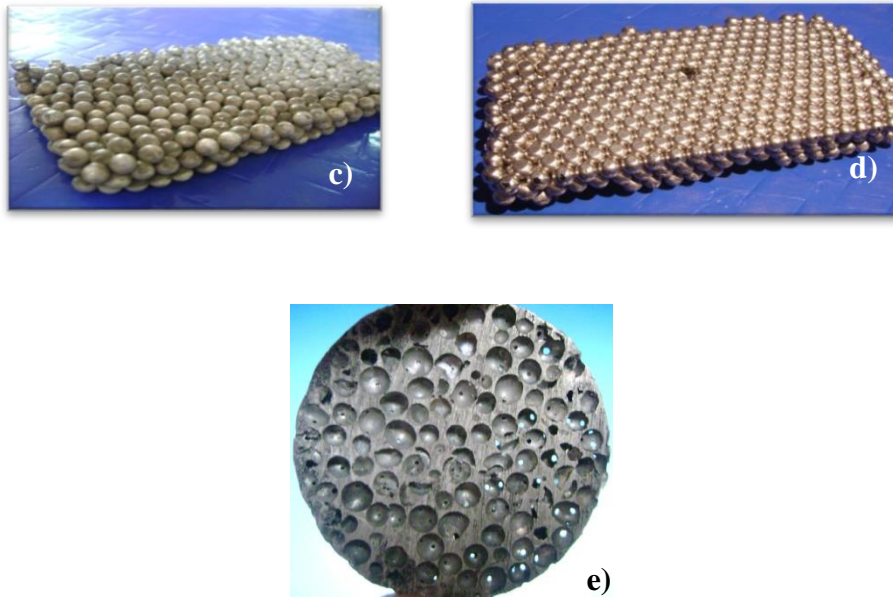


Figura 7. Electrodos evaluados: a) placa acabado tipo espejo; b) esponja recubierta de cobre; c) ópalos de plata d) ópalos de níquel y e) ópalo inverso de estaño.

La evaluación con las partículas suspendidas en el aire se realizó en una cámara de prueba utilizando cenizas volantes y una mezcla de partículas de polvo de naranja de metilo con un talco comercial.

Las cenizas utilizadas son esferas huecas provenientes de un proceso de precipitación electrostática, con un rango de tamaño promedio de 5 a 10  $\mu\text{m}$ . Por este hecho, se consideran como  $\text{PM}_{10}$  (partículas con un tamaño aproximado de 10 micras) susceptibles de estar en aerosol suspendidas en aire. Como ánodo se usó una placa de acero inoxidable de aproximadamente 40  $\text{cm}^2$  y como cátodo se usaron los electrodos a evaluar.

Bajo las condiciones de corriente y voltaje de un precipitador electrostático comercial, se realizaron depósitos de partículas tanto de cenizas volantes, como de talco y polvo de naranja de metilo. Las configuraciones del electrodo empleadas para dicha prueba fueron: una placa de acero inoxidable, una malla con un recubrimiento de cobre, una estructura de ópalo, con tamaño de esfera de 4 mm de diámetro, una de ellas recubierta de plata, otra de níquel y un ópalo inverso de estaño.

### **Estimación de la eficiencia de los electrodos.**

La estimación de la eficiencia de los electrodos se determinó mediante un balance de masa en el precipitador electrostático, considerando la masa conocida de partículas puestas en suspensión, la masa adherida a una sección de una placa del precipitador y la cantidad a la entrada y salida del precipitador, tomando en cuenta que no todas las partículas lograron entrar al precipitador.

Con la finalidad de evaluar únicamente el espacio ocupado por las estructuras utilizadas como electrodos, se aislaron las tres placas, dejando únicamente una superficie de  $10 \text{ cm}^2$ , adaptando cada uno de las estructuras sobre esta superficie para estudiarlas por separado. Se utilizaron 20 g de cenizas volantes para cada uno de los casos.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## CAPÍTULO IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1.- Síntesis de los electrodos modificados.

#### 4.1.1 Estructuras tipo Ópalo Metálico

##### 4.1.1.1 Síntesis de ópalos con poliestireno

Con la intención de formar una estructura de ópalo, se partió de pellets comerciales de poliestireno. Como primer paso, se requiere conformar una estructura mecánicamente estable. Esto se intentó haciendo coalescer las partículas al exponerlas a vapores de acetona dentro de un contenedor cuya forma adoptaría la unidad formada. Después de veinticuatro horas de ataque con acetona, se logró un bloque con buenas características en cuanto adherencia y buena permeabilidad (Fig. 8).



Figura 8. Estructura tipo ópalo de poliestireno molido.

Como segundo paso, a la estructura tipo ópalo de poliestireno, se le requiere volver eléctricamente conductora para que pueda funcionar como electrodo en el precipitador electrostático. Por lo que se continuó con el proceso de metalizado de la superficie aplicando pintura de cobre. Al introducirlo durante cinco minutos la coloración de la pintura de cobre cambia a un color más claro y, finalmente, al dejar que se adsorba plata en la superficie toma una coloración grisácea (Fig. 9).



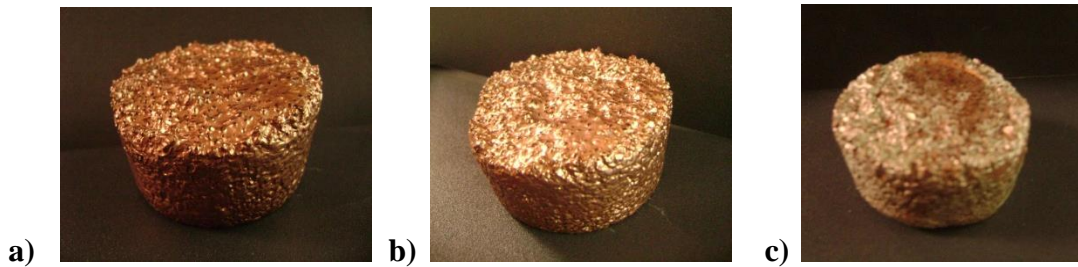


Figura 9 a) ópalo recubierto con pintura de cobre, b) ópalo después de la solución activadora de estaño y c) ópalo metálico recubierto con plata

Al finalizar la prueba, la conductividad eléctrica a través del bloque no era aún apropiada para realizar sobre ella un depósito electrolítico, ya que se presentaron zonas donde no conducía. Aunado a esto, la pintura de cobre había cubierto los huecos dentro de las partículas, haciéndolo impermeable. Así mismo, con el paso de las horas el polímero se vio afectado por los solventes de la pintura de cobre.

#### 4.1.1.2 Síntesis de ópalos de vidrio-plata

Con el mismo objetivo, se emplearon esferas de vidrio de aproximadamente tres milímetros de diámetro para conformar una estructura tipo ópalo. Estas se colocaron en un molde y se trataron térmicamente por arriba de 540 °C. Esto con la finalidad de que las esferas se uniesen entre sí, pero que no perdieran su forma. Esto se logró satisfactoriamente, al grado de tener estructuras tipo ópalo de diversos tamaños y formas. Por ejemplo, se logró una estructura con un volumen total de aproximadamente 24.54 cm<sup>3</sup> y un total de espacios internos aproximado de 4.54 cm<sup>3</sup> (una razón de 1:5.4 entre espacios y esferas determinado por la relación del volumen total de las esferas y el volumen total de las estructura). El área expuesta en primer plano es de 53.79 cm<sup>2</sup> (Figura 10).

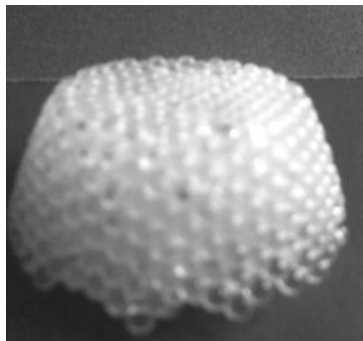


Figura 10. Estructura tipo ópalo de vidrio.

En el caso de este tipo de estructuras, se realizó un siguiente paso con la intención de realizar el metalizado de la superficie. Utilizando el proceso con la formula de Brashear, se metalizó la superficie de las esferas en estructura tipo ópalo. El ópalo de esferas pequeñas, al durar menos tiempo en contacto con la solución tuvo una coloración más clara pero presentó buena conductividad y la mínima resistencia en todas las partes recubiertas con la plata.

Posterior a esto, con la finalidad de obtener una estructura con una geometría que se pudiera acoplar al precipitador para la evaluación, se utilizó un molde de acero de un volumen de  $75 \text{ cm}^3$ ; logrando con ello un arreglo de 5 cm de ancho, 9.5 cm de largo y 1.1 cm de alto. En la Figura 11 se le puede apreciar ya recubierto con la solución de plata.



Figura 11. Estructura tipo ópalo de plata

El primer plano de la estructura consta de una superficie de 25 esferas de largo y 12 esferas de ancho, las cuales representan un área expuesta aproximada de  $144.82 \text{ cm}^2$ , considerando las esferas de 3.92 mm. Esto tomando en cuenta también que la parte de la esfera que no está en la superficie, se ve compensada con las esferas que aparecen en segundo plano y cubren los espacios entre éstas.

#### 4.1.1.3 Síntesis de ópalos de vidrio-níquel.

Como paso final del proceso, y con el objetivo de lograr una superficie conductora homogénea, con buena adherencia y mecánicamente resistente, se realizó un depósito electrolítico a partir de un baño de sulfamato de níquel. Se obtuvo la estructura metálica tipo ópalo con un depósito de Ni y presentó buenas características para su uso posterior como electrodo en un precipitador electrostático. El ópalo metálico vidrio-Ni se puede apreciar en la Figura 12.



Figura 12. Estructura tipo ópalo metálico vidrio-Ni.

El grosor del depósito de Ni fue determinado por medición de espesor por corte transversal bajo la norma ASTM B487-85(07); obteniendo un promedio de 24.158  $\mu\text{m}$  y una desviación estándar de 1.10. Las mediciones de las muestras se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.- Medición del espesor del depósito de Ni.**

No. De muestra	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	21.71
2	24.22
3	23.34
4	24.74
5	24.35
6	25.45
7	24.31
8	24.39
9	25.06
10	25.01

Una de las observaciones que destacaron en las muestras obtenidas por el procedimiento descrito consistió en que en el centro de dicha estructura se logró un recubrimiento con un color diferente al de plata y al de níquel brillante. Éste comienza a presentarse a partir de la tercera fila de esferas hacia adentro y la segunda de la parte inferior; como se puede apreciar en la Figura 13. La tonalidad aparente es un color claro con apariencia perla, con un matiz ligeramente amarillo y un acabado gris metálico, evidente solo en reflexión especular, atribuible a un delgado recubrimiento de níquel. La relevancia de este depósito se debe tanto al hecho de la apariencia estética de las esferas como al hecho de ser plata - azufre y un delgado revestimiento de níquel. Presumiblemente, este tratamiento en superficies de artículos de joyería, utensilios de plata pudiese resultar en una posible alternativa para evitar el oscurecimiento de ésta ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) por la reacción con el sulfuro de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ).



Figura 13. Interior de la estructura tipo ópalo de vidrio-Ag-Ni.

En la Figura 14 se muestran espectros de absorbancia y reflectancia correspondientes a las estructuras de ópalos con terminación superficial de Ag-Ni (parte interna del ópalo) y de Ni (parte externa del ópalo); así como la de un ópalo recubierto de plata mediante la fórmula de Brashear como punto de comparación. Esto se realizó con la finalidad de comparar el recubrimiento obtenido en la parte central de la estructura (figura 13).

En el espectrómetro (Ocean Optics USB2000) se empleó una esfera integradora con una apertura de 8 mm. Los espectros presentan un comportamiento casi lineal en la región visible del espectro electromagnético mostrando pendientes que las caracterizan.

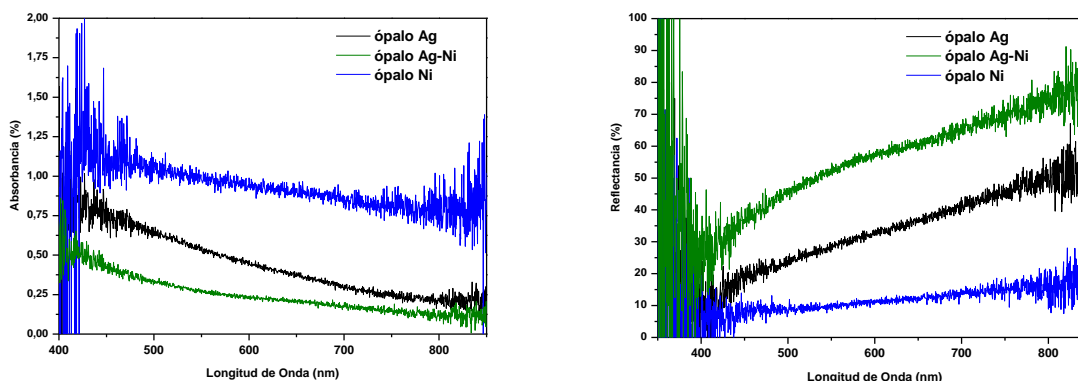


Figura 14. Espectros de absorbancia y reflectancia correspondientes a las estructuras de ópalos con terminación superficial de Ag-Ni, de Ni y de Ag vía Brashear.

En el espectro referente a la absorbancia, se puede observar que la estructura que presenta un valor más elevado es el ópalo de Ni, esto nos indica que hay una mayor pérdida de luz, al ser medida de la parte superior de la estructura y haber un mayor número de capas de esferas entre la esfera y la superficie de detección. El ópalo con el recubrimiento obtenido por la fórmula de Brashear y el correspondiente a la parte central de la estructura en estudio, presentan diferencias, lo que nos permite concluir que no se trata únicamente de plata, esto queda comprobado con el análisis EDS que se muestra posteriormente, al existir la presencia de Ni.

En el espectro de reflectancia, se presentan en orden inverso, al presentar una mayor reflectancia el ópalo de Ag-Ni, seguido del de Ag y finalmente el de Ni. La variación de pendientes está directamente relacionada a la transmitancia, debido a que la intensidad total de la luz el espectro cuantificada, está dada por la suma de la absorbancia, reflectancia y transmitancia, que para este estudio está determinada como cero. Esto se puede dar por la propagación de la luz a través de la estructura y su salida por los lados.

La Tabla 3 muestra los parámetros de color correspondientes a dichos ópalos. Por ejemplo, el parámetro CIE L\*, da una indicación de que tan oscura o clara es una superficie (0 – 100, respectivamente), mientras que  $x$  y  $y$  representan las coordenadas donde caen en el diagrama de cromaticidad y el color que le corresponde a la estructura según la región donde se ubique.

**Tabla 3. Parámetros de color para ópalos con terminación superficial de Ag –Ni y Ni, así como una placa de acero inoxidable 304 (a manera de referencia), una esponja de cobre y la estructura de ópalo inverso obtenida en estaño.**

Parámetros de color	Ópalo Ag	Ópalo Ag-Ni	Ópalo Ni
$x$	0.4883	0.5014	0.4725
$y$	0.4177	0.4157	0.1186
CIE L*	61.9	63	38.4
CIE a*	7	10.8	4
CIE b*	19	23.9	6.2
Longitud de onda dominante (nm)	587	585.4	593.5
Pureza	0.354	0.43	0.183

En la Figura 15 se presenta el diagrama de cromaticidad, usando algunos de los valores de la Tabla 3 ( $x,y$ ). La mayoría de las muestras analizadas tienen parámetros de color que caen en la región de los 580 nm con una similar pureza de color relativamente alta. Un caso de excepción es la superficie de Níquel, en la cual su lustre metálico brillante la hace caer fuera del diagrama de cromaticidad. Por otra parte, las estructuras de plata, difieren básicamente en la coordenada  $x$ , lo que nos permite visualizar una muy pequeña diferencia en el color de ambos recubrimientos.

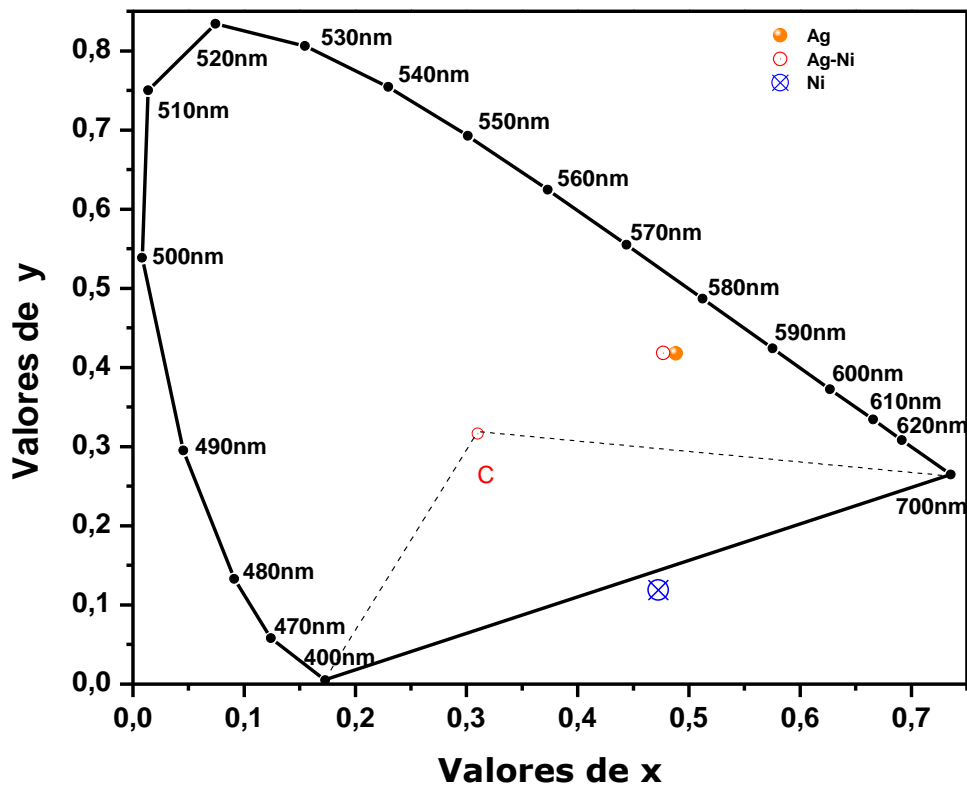


Figura 15. Diagrama de cromaticidad para estructuras de ópalos con terminación superficial de Ag y de Ni.

La observación por medio de microscopia de barrido electrónica (SEM, por sus siglas en ingles) con una ampliación de 1500x, permite apreciar la topografía de una esfera Ag correspondiente a la parte interna de la estructura de la figura 13. Se revela una superficie continua compuesta mayoritariamente por un conglomerado de partículas de unas cuantas micras. Un microanálisis por EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy), permitió identificar la presencia de plata, níquel y azufre. En la Figura 17 se presentan la grafica de los valores del análisis puntual. Ya se ha comentado la importancia que pudiese representar el hecho de la presencia de azufre en plata a la vez de preservar una excelente calidad de superficie, ya que pudiese constituir una superficie poca reactiva y estable para fines prácticos ornamentales.

Debido a las características que pudieran ser relevantes para otro tipo de aplicaciones ya mencionadas, no hay una repercusión directa del recubrimiento Ag-Ni, ya que éste solo se presenta bajo la tercer capa de esferas, la cual no tiene una aportación significativa para la captación de partículas por el arreglo posteriormente descrito.

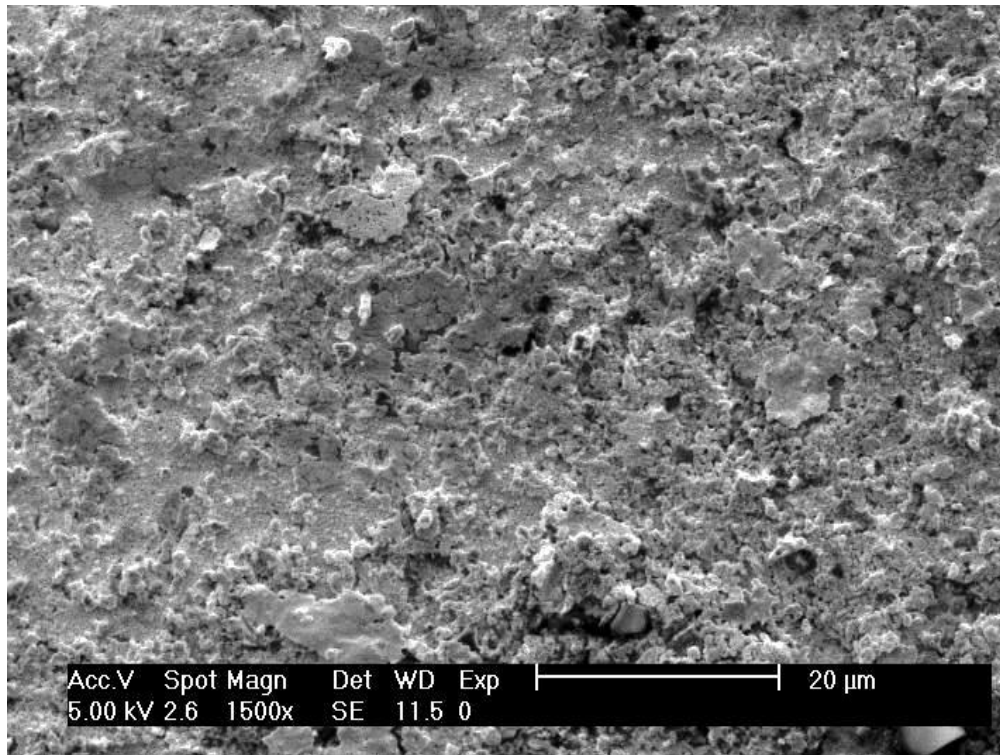


Figura 16. Micrografía de la superficie de una esfera con acabado en plata-níquel correspondiente a la sección central en la Figura 13.

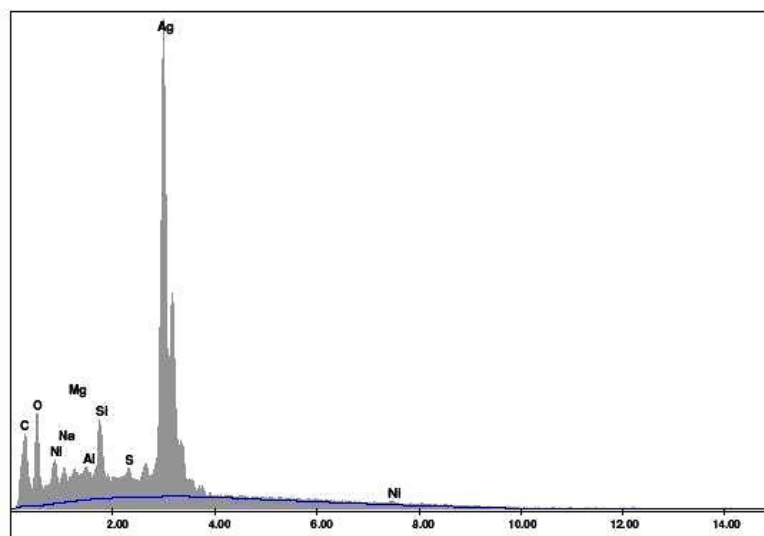




Figura 17. Espectro de EDS de una estructura de ópalo con terminación superficial de Ag. Esto corresponde a la sección central en la Figura 13.

En otra vertiente, con la finalidad de evitar la pérdida de corriente ocurrida en la estructura anteriormente descrita, y obtener el depósito de níquel brillante en las capas internas, del mismo modo que para los electrodos de vidrio-plata, se utilizó un molde rectangular y se logró un nuevo arreglo con tres capas de esferas de 4 mm de diámetro. Esto con la finalidad de hacer la similitud a la geometría de una placa para tomarla como electrodo y hacer una aproximación matemática en función de la longitud de éste (Fig. 18).

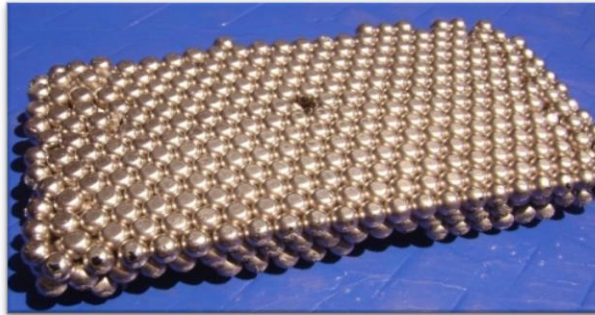


Figura 18. Estructura rectangular tipo ópalo metálico vidrio-Ni.

Para fines de modificación de tamaño de esfera, se puede determinar el área superficial de todo el arreglo mediante la siguiente ecuación:

$$A = (\pi L_1 L_2 L_3) / (2r), \quad (1)$$

siendo,  $L_i$  la longitud de los lados del arreglo y  $r$  el radio de la esfera.

#### 4.1.2 Síntesis de ópalos inversos de estaño.

Tras el ataque con la solución de ácido fluorhídrico, se removieron las esferas de sílica gel lográndose obtener la estructura tipo ópalo inverso. La Figura 19 muestra dicha estructura de estaño con poros alrededor de 3 mm de diámetro, interconectados con túneles menores a 1 mm.

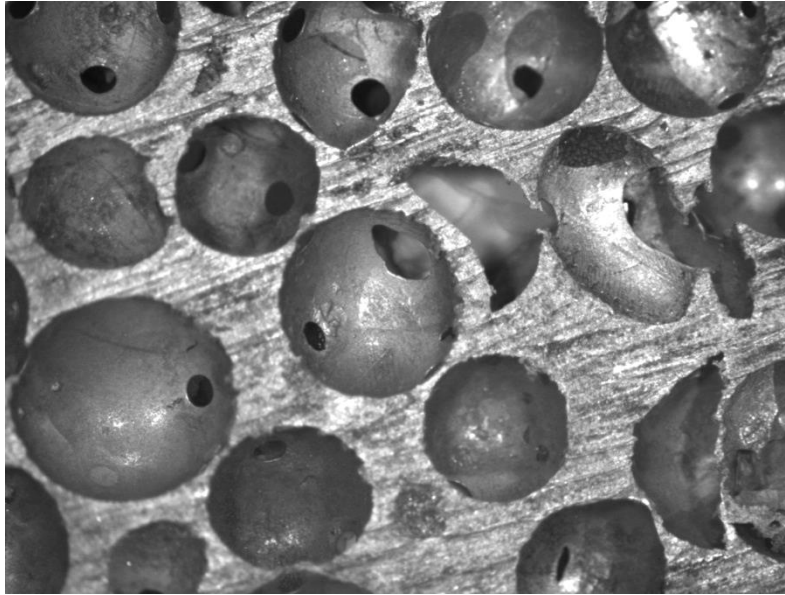


Figura 19. Estructura tipo ópalo inverso de estaño.

En la Figura 20 se muestran los espectros de absorbancia y reflectancia de las estructuras bajo estudio. Una muestra clara de la posible influencia de la intensidad de las gráficas por efectos de la transmitancia que puede llegar a presentarse en las estructuras abiertas la constituye la esponja de cobre conductora. En ella, la luz encuentra una salida no cuantificada únicamente en reflectancia y absorbancia, dado que es la suma de las tres lo que da igual a la intensidad incidente, comentado anteriormente. Sin embargo, dada la condición experimental de medición y la característica de estructuras abiertas, la intensidad tanto de absorbancia como de reflectancia puede tener una alteración en caso de que la transmitancia no sea igual a cero, ya sea por transmisión directa a través de la muestra o dispersión difusa por los conductos de la estructura.

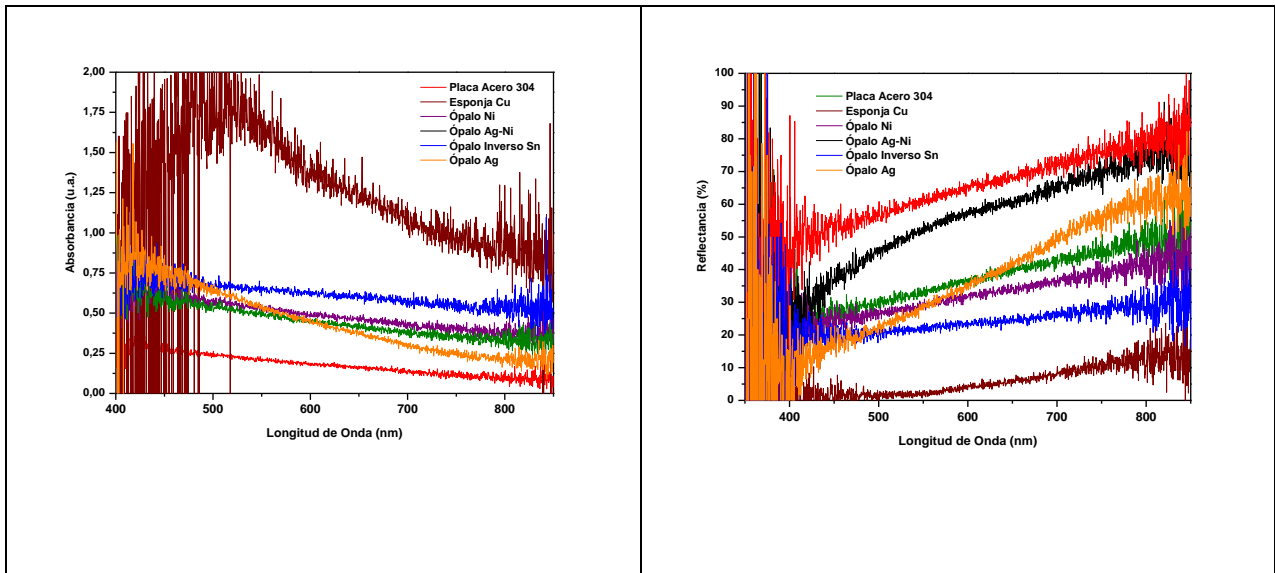


Figura 20. Espectros de absorbancia y reflectancia correspondientes a las estructuras de ópalos con terminación superficial de Ag-Ni y de Ni.

En este caso, el que presenta un menor nivel de absorbancia es la placa de acero, debido a que la mayor parte la luz es reflejada y transmitida, por ello la diferencia de pendientes en ambas gráficas. La esponja de cobre es la que presenta una mayor absorbancia, al perderse la mayor intensidad por la apertura que tiene la estructura, siendo comprobado esto al presentar la menor reflectancia. Las estructuras tipo ópalo y ópalo inverso presentan un comportamiento similar en cuanto a pendientes se refiere, la apertura en las estructuras tipo ópalo de Ni y de Ag es similar, ya que la diferencia entre ellos es únicamente el recubrimiento.

#### 4.2.- Evaluación de los electrodos en un diseño de precipitador electrostático.

Al hacer la evaluación con las cenizas volantes y el naranja de metilo, se presenta prácticamente el mismo comportamiento de las partículas (Figuras 21 y 22).

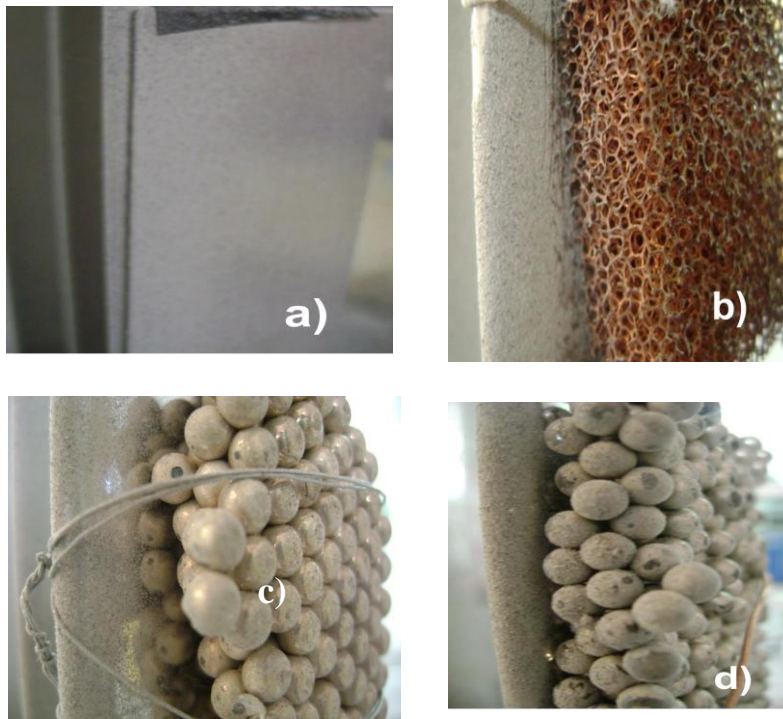


Figura 21. Depósito de partículas de cenizas volantes: a) placa acabado tipo espejo; b) esponja recubierta de cobre; c) ópalos de plata y d) ópalos de níquel.

En ambos casos se observa en la placa un depósito homogéneo, el cual presentó una cobertura completa, como se puede apreciar en las Figuras 21 a) y 22 a). Los depósitos en la esponja dependen de la apertura, permitiendo el paso de las partículas a través de ésta. Otro factor importante fue la densidad de corriente de punto a punto en la malla, presentando mayor cantidad de depósito en la parte más cercana al punto donde se suministró la corriente.

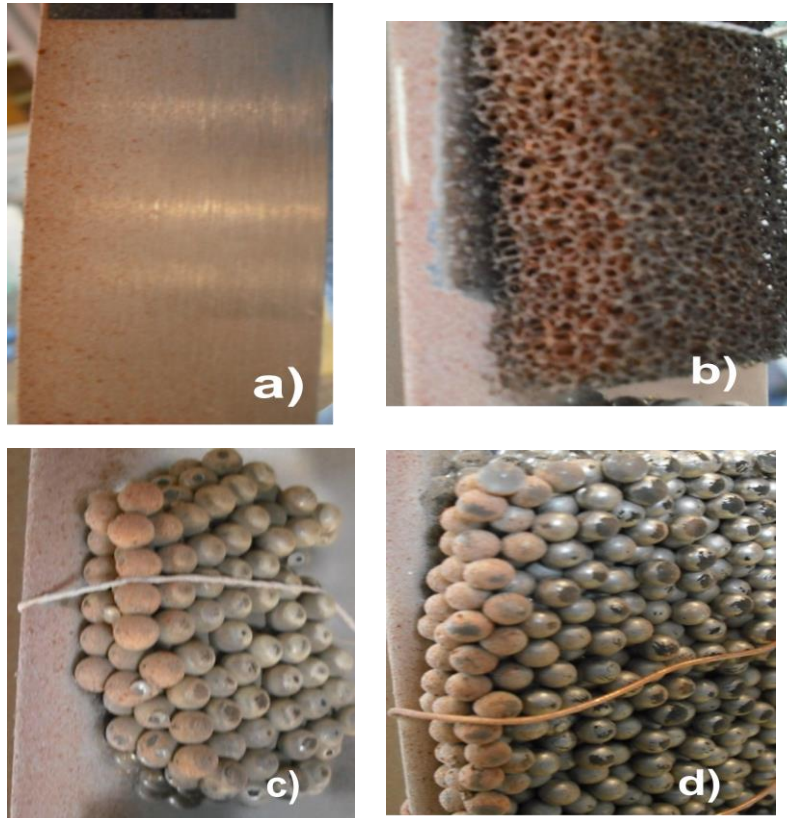
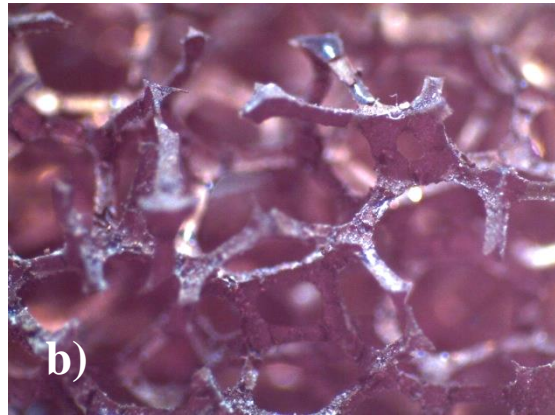
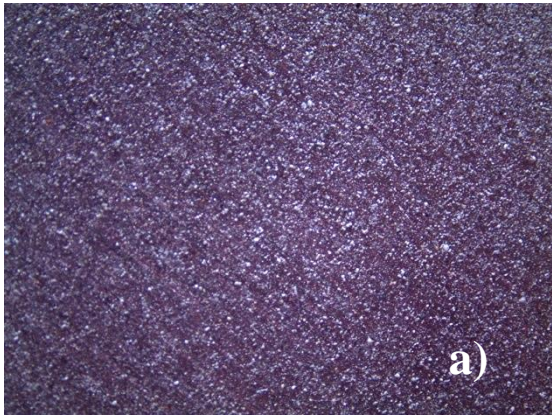


Figura 22. Depósito de partículas de naranja de metilo: a) placa acabado tipo espejo; b) esponja recubierta de cobre; c) ópalos de plata y d) ópalos de níquel.

En relación a la estructura tipo ópalo, la distinción es en función de la densidad de corriente en la superficie. La plata, al reaccionar con el azufre en su superficie (iniciando una capa de pátina), disminuye la conductividad bajando la densidad de corriente, proporcionando algunas diferencias con los ópalos recubiertos con níquel.

Al hacer la similitud con un filtro, el arreglo presenta una resistencia al flujo de las partículas, por lo que hay un mayor depósito en los primeros planos alcanzando el punto de saturación. Sin embargo, el arreglo de esferas en configuración de ópalo presenta una mayor área en los primeros planos. Esto puede ser apreciado en las siguientes micrografías (figura 23), donde se aprecia el depósito dentro de los poros del ópalo inverso.



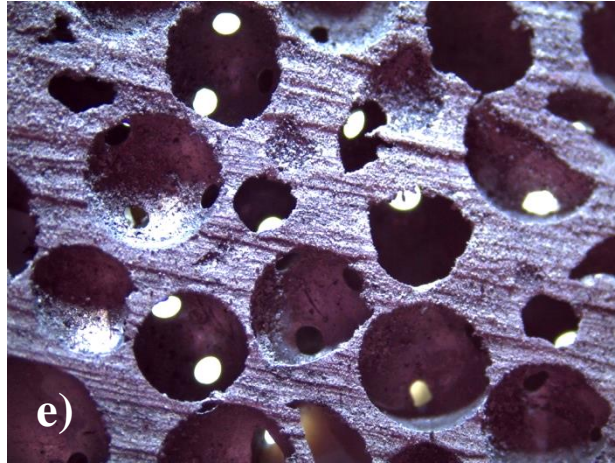


Figura 23. Micrografías de los depósitos de cenizas en : a) placa acabado tipo espejo; b) esponja recubierta de cobre; c) ópalos de plata, d) ópalos de níquel, y e) estructura ópalo inverso de estaño.

Una combinación de ambas características favorables de la malla y el arreglo tipo ópalos, se presenta en el ópalo inverso. Esta estructura consiste de material sólido en los espacios entre las esferas del ópalo y espacios vacíos en la ubicación de éstas. Con ésta, el flujo de partículas suspendidas podría cruzar por los canales de la estructura con un balance óptimo entre resistencia al flujo y área superficial.

En relación al área de depósito, se propone una modificación a la Ecuación 1, la cual permitiría calcular el área interna de la estructura de ópalo inverso, tomando en cuenta el área sacrificada por las conexiones entre las esferas (Ecuación 2):

$$A = (\pi L_1 L_2 L_3) / (2r) - 6 \pi (r_{\text{tun}})^2, \quad (2)$$

donde,  $r_{\text{tun}}$  es el radio del área transversal del túnel o canal,  $L_i$  la longitud de los lados del arreglo y  $r$  el radio de la esfera. El  $r_{\text{tun}}$  se ajusta con la finalidad de tener un flujo óptimo a través de esta estructura.

Haciendo un comparativo con las áreas de los electrodos, y suponiendo que ya se obtuvo el ópalo inverso de estaño de características deseadas, se puede observar en la Tabla 5, tomando como referencia una placa con un área de  $46 \text{ cm}^2$ , el arreglo tipo ópalo presenta un gran incremento de área para la primer capa de esferas hasta de un 300%. De la misma manera, un modelo de ópalo inverso con un acomodo óptimo y ordenado, ofrece un área similar o con una diferencia poco significativa. Sin embargo, éste presenta una menor

resistencia al flujo que el ópalo mismo, permitiendo un mejor depósito de las partículas. Así pues, esta estructura ofrece una optimización en el aprovechamiento del espacio dentro del precipitador.

**Tabla 5. Comparación de las áreas de los electrodos.**

<b>Electrodo</b>	<b>Área ( cm<sup>2</sup>)</b>
Placa de acero (tipo espejo)	46
Ópalo vidrio- plata	144.82
Ópalo vidrio- níquel	144.82
Ópalo inverso de estaño	144.78

Sin embargo, por mínima que sea la diferencia de áreas del ópalo y el ópalo inverso, el proceso de fabricación del ópalo es más tardado, al hacer los diferentes recubrimientos, mientras que para el ópalo inverso es necesario un menor tiempo, pero es más complicado el obtener la estructura perfecta debido a las dificultades comentadas en la sección anterior.

La determinación del flujo másico se realizó haciendo uso de la siguiente gráfica, donde se relacionó la cantidad de cenizas (g) sobre el cuarzo de la microbalanza en función del tiempo.

### **Estimación de la eficiencia de los electrodos**

Los resultados obtenidos de la evaluación se presenta en la siguiente tabla, en la cual se puede observar que la mejor retención de partículas la presenta el ópalo recubierto de níquel, esto debido a que presenta un recubrimiento más uniforme que el de plata, teniendo éstos la misma área.

**Tabla 6 . Estimación de la eficiencia de los electrodos**

<b>Electrodos</b>	<b>% de retención</b>
Placa plana	80.7
Ópalo de Níquel	94.29



Ópalo de Plata	92.3
Ópalo inverso de Estaño	89.2

Se esperaba que el ópalo inverso presentara los mejores resultados, sin embargo, no fue posible obtener la estructura perfecta, la cual presentara de una manera ordenada tanto los túneles como el acomodo de las esferas.

Para la evaluación de la eficiencia de los precipitadores, las ecuaciones son principalmente teóricas y no son aplicables para precipitadores de bajos voltajes y partículas suspendidas; lo que concuerda con lo reportado por Rose y Wood [39]; y White quienes en sus trabajos realizaron la búsqueda de una relación satisfactoria entre el movimiento de las partículas cargadas en el campo eléctrico, calculado a partir de las ecuaciones puramente teóricas y la eficiencia real del precipitador [40].

No fue posible deducir, en la práctica, ecuaciones matemáticas que permitieran calcular la eficiencia de un precipitador electrostático a partir de primeros principios. Algunas de las razones de esto son las siguientes:

1. Las dificultades en medir el tamaño de la partícula con precisión, ya mencionadas antes, particularmente cuando no es esférica.
2. El calculo de la fuerza del campo eléctrico para el tipo de única etapa entraña grandes problemas y, hasta la fecha, no se ha deducido alguna solución satisfactoria.
3. Quizá lo más importante sea que, en un precipitador comercial, el flujo del gas no es laminar. Los precipitadores trabajan a flujo turbulento [41].
4. Del mismo modo, para lograr una mejora de la eficiencia para los precipitadores en espacios cerrados, es decir, en espacios laborales y para partículas suspendidas, sin una corriente o un flujo específico, habría que tomar en cuenta la ventilación de la habitación, ya sea mediante un extractor o un simple ventilador para orientar las partículas hacia el precipitador.

Un factor que influye para la distribución del depósito sobre los electrodos es la relación entre distancia que existe del alambre a la placa colectora y el voltaje aplicado a

éste; es decir, la intensidad del campo eléctrico. En la siguiente figura se puede apreciar cómo va disminuyendo la cantidad de partículas depositadas conforme la distancia es mayor.

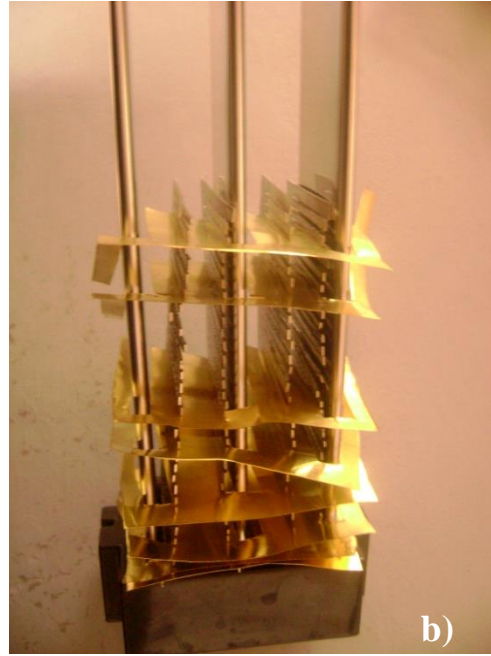


Figura 26. Disminución de la cantidad de depósito en función de la distancia con el alambre.

Un acomodo de placas intercaladas entre los recolectores del precipitador, sería una manera de optimizar del mismo modo el espacio dentro del precipitador sin necesidad de recurrir a nuevos procesos, simulando esto a un ópalo inverso, pero sustituyendo la forma esférica por la forma cúbica. En la Figura 27 a), se puede apreciar mejor el diseño original del precipitador comercial, mientras que en la Figura 27 b), se muestra el diseño descrito anteriormente.



**a)**



**b)**

Figura 27. a) Arreglo original del precipitador; b) Arreglo de placas intercaladas entre los platos recolectores del precipitador.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

y

PERSPECTIVAS

## CONCLUSIONES

En el proceso de obtención de la estructura de tipo ópalo inverso, se lograron obtener estructuras de ópalos metálicos, tanto de plata como de níquel, así como la estructura tipo ópalo inverso. La mejor vía de obtención de los ópalos metálicos fue mediante el recubrimiento de un ópalo de vidrio a base de esferas de vidrio de 4 mm de diámetro previamente unidas mediante tratamiento térmico. Se aplicó primero un recubrimiento de plata mediante la fórmula de Brashear y un posterior depósito electrolítico de níquel. Para los ópalos inversos, la técnica que dio mejor resultado fue mediante la fundición de estaño aplicado sobre partículas de sílica gel y retirando éstas mediante una solución de ácido fluorhídrico-agua, obteniendo así una estructura con poros de 3 mm de diámetro y túneles de hasta 1 mm.

Esta estructura proporciona una mayor área superficial comparada con la que ofrece un electrodo con acabado tipo espejo o placa plana aumentándola hasta en un 300% para una superficie de 46 cm<sup>2</sup>. Con ello se logra optimizar el espacio dentro del precipitador, aumentando la capacidad de captura y disminuyendo la frecuencia de servicios de limpieza.

Las estructuras analizadas, tanto la malla como el ópalo presentan, factores favorables y desfavorables. En el caso de la malla, debido a sus aperturas de poros ofrece una menor resistencia al flujo de las partículas pero una baja distribución de la corriente. Por otro lado, el ópalo posee una mayor área superficial pero mayor resistencia al flujo.

El depósito de partículas en las diferentes estructuras analizadas empleadas en un precipitador electrostático, presentaron similares espesores y homogeneidad de depósito. La capacidad está directamente relacionada al área efectiva e inversamente proporcional a la resistencia al flujo.

La estructura tipo ópalo inverso metálico conjuga ambos factores para incrementar la capacidad y la eficiencia de depósito de las partículas suspendidas; así como una mejor resistencia mecánica respecto a los ópalos de vidrio. Sin embargo, un acomodo de placas intercaladas entre las placas del precipitador, sería una manera de optimizar del mismo

modo el espacio dentro del precipitador sin necesidad de recurrir a nuevos procesos, simulando esto a un ópalo inverso, pero sustituyendo la forma esférica por la forma cúbica.

## **PERSPECTIVAS.**

Posibles alternativas para la determinación cuantitativa de la eficiencia del precipitador, se pueden desarrollar con evaluaciones con ayuda de una microbalanza de cristal de cuarzo en diferentes puntos de la entrada y la salida del precipitador; haciendo uso de algunos cálculos que se realizaron también en este proyecto. Otra alternativa es el análisis de imágenes para determinar la cantidad de partículas depositadas; o bien adquirir un contador de partículas y aplicar un flujo continuo.

Un aumento en la eficiencia de precipitadores electrostáticos podría llegar a alcanzarse intercalando en el diseño un mayor número de filamentos (cátodos) y reduciendo aquellas áreas en los ánodos que distan de ellos.

El sistema de precipitadores electrostáticos es susceptible de ser modelado con software como COMSOL Multiphysics en busca de condiciones que eficienten su operación; se propone una modelación matemática de las diferentes variables involucradas como flujo, voltaje utilizado, áreas de los electrodos, entre otros. Del mismo modo se pudiera modelar las estructuras tipo ópalo y ópalo inverso.

La preparación de estructuras de ópalos inversos involucra una serie de condiciones que podrían eficientizarse con la intención de maximizar áreas internas efectivas y a la vez propiciar flujos turbulentos en beneficio de un mayor depósito de partícula suspendidas en aire o incluso en agua.

La preparación y un estudio más profundo del recubrimiento obtenido en los ópalos de plata y níquel, presenta una gran oportunidad de desarrollo de un nuevo método de protección de la plata, para evitar la formación de la coloración oscura generada por la pátina.

# CAPÍTULO VI

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## CAPÍTULO VI.-REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1].- Guadalupe De la Luz González; Calidad del aire en las principales ciudades de México; Dirección General de Gestión e Información Ambiental; Instituto Nacional de Ecología. México, Abril del 2000.
- [2].- De Nevers Noel; “Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire”; Editorial Mc Graw-Hill Interamericana; (1998)
- [3].- Secretaría del Medio Ambiente e Instituto Nacional de Salud Pública. “¿Dónde causa daño?”. Fascículo impreso por Grupo Arma S.A. de C.V. México
- [4].- Del Pont, L. M.; “El Crimen de la Contaminación”; Editorial Villicaña; México(1984)
- [5].- Norma Oficial Mexicana NOM 024-SSA1-1993
- [6].- Norma Oficial Mexicana NOM 025-SSA1-1993
- [7].- P.A. de Souza JR; R.S De Queiroz, T. Morimoto, A.F. Guimaraez, V.K. Garg; G. Klingelhöfer; Hyperfine Interactions; 2002; 139/140; 641-649.
- [8].- Coulsona G., Bartonovab A., Bøhlerb T; Indoor Built Environ; 2005 14;3-4:209–213
- [9].- Kumar P Indoor and Built Environment; 2001; 10; 95
- [10].- Wang H., Chen J., Zhang H.; Indoor and Built Environment; 2001; 10; 52
- [11].- Seskauskas V.; Kubiliené E.; Indoor Built Environ; 1997; 6; 204-209.
- [12].- Lawrence A. J.; Taneja A.; Indoor Built Environ; 2005; 14; 321–329.
- [13].- Lai A. C.K.; Indoor Built Environ 2006; 15:179–186.
- [14].- Jiménez Cisneros, Blanca E.; “La Contaminación Ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada”; Editorial LIMUSA, Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISA (2001).
- [15].- Notas Técnicas desarrolladas por la Unidad de Servicios Técnicos de FiberGlass Colombia S.A.; Abril 2004.
- [16].- Tippens, Paul E.; “Física: Conceptos y aplicaciones”; Editorial Mc Graw Hill; México (1994).
- [17].- Alistair C. Rickman ; Indoor and Built Environment; 1992; 1; 351
- [18].- Waring M.S., Siegel J. A., Corsi R. L.; Atmospheric Environment (2008), doi:10.1016/j. atmosenv.2008.02.011



- 
- [19].- Nikas K.S.P., Varonos A.A., Bergeles G.C.; 2005; Journal of Electrostatics; 63; 423–443
- [20].- Lei H., Wang L., Wu Z.; Journal of Computational Physics ; 2004; 193; 697–707
- [21].- Chang J.; Journal of Electrostatics; 2003; 57; 273–291
- [22].- Podlinski J., Niewulisa A., Mizeraczyka J., Attenc P., Journal of Electrostatics; 2008; 66; 246–253
- [23].- Kudo T., Kudo Y., Ruike A.; Catalysis Today ; 2007; 122 ; 14–19
- [24].- Sillanpää M. Geller M., Phuleria H., Sioutas Constantinos; Aerosol Science; 2008; 39; 335 – 347
- [25]. - Mizuno A.; IEEE Trans. Dielectr. Electr. Ins.; 2000; 5; 615–624.
- [26].- Kocik M., Dekowski J., Mizeraczyk J.; Journal of Electrostatics; 2005; 63; 761–766
- [27].- Kuroda Y., Kawada Y.; Journal of Electrostatics; 2003; 57; 407–415
- [28].- Yeo S.H, Teh L.K., Wong C.C. ; J Porous Mater; 2006; 13: 281–285
- [29].- Juárez B. H; López C.; J. Phys. Chem. B.; 2004; 108, No.43, 16708-16712.
- [30]. - Wang L., Zhao X. S.; Fabrication of Opals and Inverse Opals with a Planar; presentación de poster; TNT2006; 04-08 September, Grenoble, Francia.
- [31].- R. Taheri. I. Oguocha, S. Yannacopoulos. “The tribological characteristics of electroless Ni-P coatings”. *Wear*. Vol. 249. 2001. pp. 389-339.
- [32].- Universidad Pontificia Boliviana; Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales. Implementación de producción más limpia en el sector de la industria de recubrimiento metálico. 1999
- [33].- Lorena Magallón Cacho; Tesis de Maestría : “Sustitución de la etapa de ataque químico del proceso electroless en el metalizado de superficies conductoras”; Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. 2006
- [34].- Juliana Itzel Vázquez Mejía, Tesis de Licenciatura: “Síntesis de microesferas para la formación de ópalos sintéticos y posterior conformación de ópalos inversos aplicados a la prevención de la corrosión”. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Veracruzana. 2008.
- [35].- Patent US3372059-A, DOW CHEM GMBH; Ag, Cu or Ni-plating onto non-conductive glass or plastic surfaces by the Brashear, Rochelle salt or formaldehyde wet reduction processes is improved by the add, 1968.

- 
- [36]. - Patent US4403001; Grenier; John W. (General Electric Company), Electroless application of a silver coating to diamond particles, 1981.
- [37].- Tsuru, Y.; Nomura, M; Foulkes, F.R., 2002; Effects of boric acid on hydrogen evolution and internal stress in films deposited from a nickel sulfamate bath, Journal of Applied Electrochemistry 32, pp. 629-634.
- [38].- Kelly, JJ; Goods, SH; Talin, AA, Hachman, JT, 2006; Electrodeposition of Ni from low-temperature sulfamate electrolytes I. Electrochemistry and film stress, Journal of the Electrochemical Society 153, pp. C318-C324.
- [39].- Rose H. E.; Wood A. J.; An Introduction to electrostatic precipitation in theory and practice; Constable, London 1966.
- [40].- White J.; Industrial Electrostatic Precipitation; Pergamon Press; Oxford, 1963
- [41].- Parker Albert; “Contaminación del aire por la industria”; Editorial Reverté; 2001.