

II ANTECEDENTES

II ANTECEDENTES

A nuestro alrededor existen muchas formas de materia a tamaño nanométrico. Uno de los primeros materiales sintetizados por el hombre, que se tiene conocimiento, es una suspensión de nanopartículas de oro. Faraday preparó oro coloidal en 1856 y lo llamó "metal dividido". En su diario con fecha del 2 de abril de 1856, Faraday llamó las partículas que hizo "estado de oro dividido", estas suspensiones que fueron preparadas por Faraday son conservadas en la *Royal Institution*.

El oro metálico, cuando es dividido en finas partículas que van en tamaños de partícula de 10 a 500 nm, puede ser suspendido en agua. En 1890, el bacteriólogo alemán Robert Koch descubrió que los compuestos elaborados con oro inhiben el crecimiento de bacterias, por lo que ganó el premio Nobel de Medicina en 1905. En el sistema indio de medicina llamada Ayurveda, el oro es utilizado en diversas preparaciones. Una preparación popular se llama "Saraswatharishtam", prescrito para mejorar la memoria. El oro también se agregó en determinados medicamentos para los bebés, con el fin de mejorar su capacidad mental.

En diciembre 29 de 1959, el físico ganador del premio Nobel, Richard Feynman dio una plática en la reunión anual de la *American Physical Society* titulada "Hay mucho espacio en el fondo" ("*There's plenty of room at the bottom*"), en la que realizó una importante contribución al desarrollo de la nanotecnología. Comenzó la charla con una pregunta: "¿Por qué no podemos escribir los 24 volúmenes completos de la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler?". Minutos después Feynman reflexionaba: "*Los principios de la Física, tal y como yo lo veo, no impiden la posibilidad de manipular las cosas átomo a átomo*". Desde ese punto de partida, y con su enorme facilidad para explicar de forma sencilla conceptos complejos, Feynman predijo lo que sería necesario hacer y

cómo habría que hacerlo, en una época en la que la tecnología aún estaba lejos de poder acometer la tarea de la miniaturización.

Fundamentalmente, demostró que con las leyes de la física conocidas en ese momento, la nanotecnología era posible. A continuación, propuso una serie de ideas para lograr miniaturizaciones de dispositivos. Entre ellas, la posibilidad de disponer los átomos individualmente de la forma que deseemos. Sin embargo, el mundo tuvo que esperar mucho tiempo para poner los átomos en el lugar requerido [4].

II.1 Aspectos Teóricos

II.1.1 Nanomateriales

Los materiales creados a esta escala, denominados de forma general, nanomateriales, suponen una gran novedad respecto a los materiales tradicionales, no solo en cuanto a su tamaño, sino principalmente por sus propiedades. Muchas de estas propiedades en los materiales dependen de cómo se comporten los electrones que se mueven en su seno y de cómo estén ordenados los átomos en la materia. En un nanomaterial, el movimiento de los electrones está muy limitado por las dimensiones del propio material. Además, la proporción de átomos en la superficie con respecto al interior es mucho más alta que en materiales de tamaño más elevado. Por consiguiente, si reducimos las dimensiones de un material, modificaremos sus propiedades y en consecuencia podremos diseñar materiales con propiedades deseadas [5]. En la Figura 4 se muestran algunos objetos y sus intervalos de dimensión.

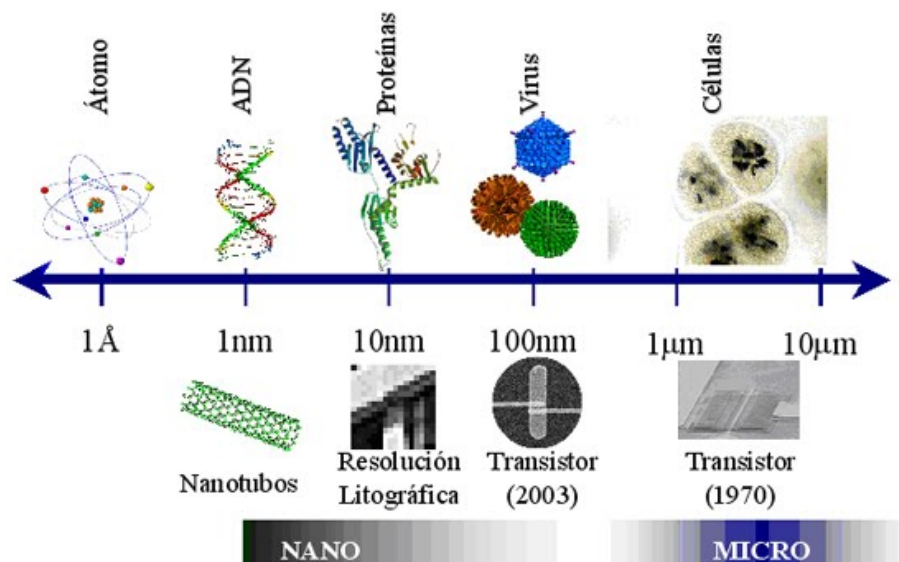


Figura 4. Escala de dimensiones de algunos objetos [6].

II.1.1.1 Definición

Son materiales a nanoescala, materiales con características estructurales de al menos una dimensión entre 1-100 nanómetros [7].

Los materiales convencionales tienen un tamaño de grano que va desde los micrómetros a cientos de milímetros, y contiene cientos de billones de átomos cada uno. Con un tamaño de grano de un nanómetro, estos tan sólo contienen alrededor de 900 átomos cada uno. Como el tamaño del grano es pequeño, hay un significativo incremento en la fracción de intercaras y fronteras de grano por volumen. Esta característica influye en las propiedades fisicoquímicas del material.

Empleando una gran variedad de métodos de síntesis, es posible producir materiales nanoestructurados en forma de películas delgadas, envolturas de materiales, en polvos y prácticamente con cualquier forma [8].

II.1.1.2 Clasificación

Una de las clasificaciones propuestas más acertada para los nanomateriales los divide en base a sus dimensiones o la de alguno de sus componentes. Se establecen así cuatro categorías: 0D, 1D, 2D y 3D, indicándose con esta nomenclatura cuántas de las dimensiones de la nanoestructura caen el rango de la nanoescala, por ejemplo 0D se refiere a nanopartículas o “*Quantum dots*”, 1D a nanotubos o nanoalambres y 2D a películas delgadas (ver Figura 5). Así, no se deberían incluir en la categoría de nanoestructuras los materiales llamados 3D, ya que todas sus dimensiones serán mayores de 100nm. Sin embargo, se consideran materiales nanoestructurados 3D a aquellos en los que se utilizan nanoestructuras (0D, 1D o 2D) como bloques de construcción, replicándose en las 3 direcciones del espacio de forma ordenada [9].

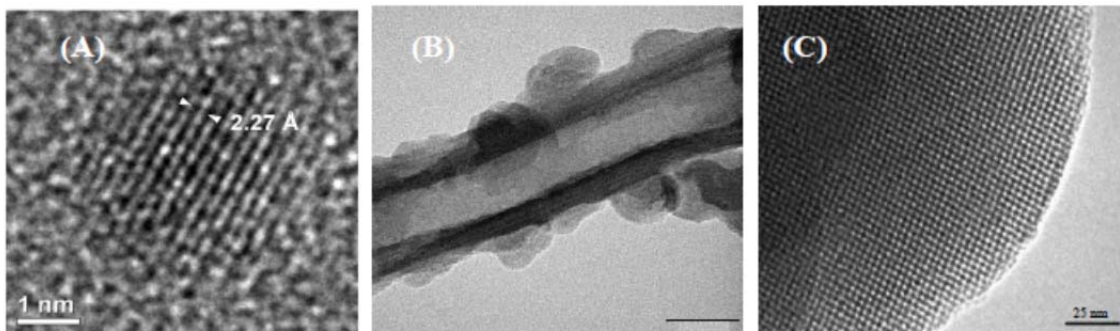


Figura 5. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión de diferentes materiales nanoestructurados. (A) Nanopartícula de Pd (nanoestructura 0D), (B) Nanotubo de sílice (nanoestructura 1D) y (C) Sílice con porosidad ordenada de forma cúbica en el rango de los nanómetros conocida como MCM48 (nanoestructura 3D) [9].

II.1.1.2.1 Nanopartículas

Las nanopartículas o nanocristales de metales, semiconductores u óxidos son de particular interés para sus propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas, ópticas, químicas, entre otras. Las nanopartículas se han utilizado como puntos cuánticos y como catalizadores químicos.

Las nanopartículas son de gran interés científico, ya que son efectivamente un puente entre los materiales a granel y las estructuras atómicas o moleculares. Un material a granel debe tener propiedades físicas constantes, independientemente de su tamaño, pero en la nanoescala no suele ser el caso.

II.1.1.3 Estructura y propiedades

Un aspecto importante de la nanotecnología, es el enorme aumento en la relación del área superficial y de volumen presente en los materiales a nanoescala, lo que hace posible, nuevos efectos relacionados con la mecánica cuántica. Un ejemplo es el "efecto de tamaño cuántico" en las propiedades electrónicas de los sólidos que se alteran con grandes reducciones en el tamaño de las partículas. Este efecto no entra en juego por ir de macro a micro dimensiones. Sin embargo, es pronunciado cuando el rango de tamaño nanométrico se alcanza. Un cierto número de propiedades físicas también se alteran con el cambio de los sistemas macroscópicos. Los materiales reducidos a escala nanométrica de repente pueden mostrar propiedades muy diferentes en comparación con lo que exhiben en la macroescala, lo que permite aplicaciones únicas. Por ejemplo, sustancias opacas se vuelven transparentes (cobre), materiales inertes lograr propiedades catalíticas (platino), materiales estables cambian a combustibles (aluminio), aislantes convertidos en conductores (silicio). Los materiales como el oro, que es químicamente inerte a

escala normal, pueden servir como catalizador químico potente a nanoescala [10].

II.1.1.4 Importancia y aplicaciones

La *National Nanotechnology Initiative* señala algunas líneas de avance de las nanopartículas con aplicaciones a numerosos campos:

Mientras la nanotecnología está en una etapa que podríamos calificar de pre-competitiva con aplicaciones en la práctica limitadas, las nanopartículas en cambio, se están utilizando en un buen número de industrias para usos electrónicos, magnéticos y optoelectrónicos, biomédicos, farmacéuticos, cosméticos, energéticos, catalíticos y en la ciencia de los materiales [11].

II.1.2 Nanocatalizadores

II.1.2.1 Definición

La acción catalítica, en general, es la capacidad de ciertos materiales para provocar con su presencia un medio adecuado para que se lleven a cabo reacciones químicas, sin ser ellos mismos modificados por esta reacción. En los sistemas de escape, los metales nobles desempeñan el papel de estos materiales catalíticos (catalizadores) [12].

Un nanocatalizador es una sustancia o material con propiedades catalíticas que tiene al menos una dimensión a nanoescala, ya sea externa o en términos de las estructuras internas [13].

La larga historia de la comercialización con éxito de la catálisis está acompañada por el desarrollo de muchas técnicas para preparar catalizadores,

en un intento de optimizar sus propiedades. Sin embargo, a pesar del esfuerzo, la capacidad de diseño personalizado de sitios activos, la selectividad y la actividad deseable, sigue siendo una meta que aún no se ha alcanzado. El mejor "control" de un proceso catalítico sigue siendo un gran desafío. Las nuevas técnicas puestas a disposición por la nanotecnología han dado lugar a algunos progresos hacia el logro de este objetivo [14].

II.1.2.2 Importancia y aplicaciones

La importancia de la catálisis es inmensa. Los catalizadores se utilizan para cultivar los alimentos que comemos (a través de la síntesis de fertilizantes y pesticidas), y para hacerlo más atractivo (a través de la fabricación de sabores y edulcorantes). La ropa que usamos contiene fibras sintéticas, fabricadas utilizando catalizadores, las cuales vienen en hermosos colores, porque los catalizadores, utilizados para hacer los tintes de larga duración, producen una variedad infinita de matices. Los automóviles que conducimos dependen de la catálisis, por ejemplo: la refinación de combustibles, los lubricantes del motor, líquido de frenos, anticongelante, detalles interiores duraderos y componentes de alto impacto de polímero, así como para los importantes catalizadores amigables con el medio ambiente, que eliminan una gran parte del problema de formación de subproductos en la combustión que contaminan el aire que respiramos. En general, la catálisis está involucrada en alrededor del 90% de los procesos de química moderna, acortando una amplia brecha de tiempo en la obtención de combustibles, plásticos, las industrias farmacéuticas, etc. [15].

II.2 Nanopartículas de Oro

El oro coloidal es una suspensión de partículas de oro de tamaño nanométrico en un líquido, usualmente agua. El líquido suele ser de un color rojo intenso

(para partículas de menos de 100nm), o un color amarillento sucio (para partículas de mayor tamaño) [16] [17]. En la Figura 6 se muestra oro en suspensión.



Figura 6. Solución con nanopartículas de Oro.

II.2.1 Síntesis

En general, las nanopartículas de oro se producen en un líquido por la reducción de ácido cloroaurico ($\text{H}[\text{AuCl}_4]$), aunque existen métodos más avanzados y precisos. Después de disolver $\text{H}[\text{AuCl}_4]$, la solución se agita rápidamente mientras se le añade un agente reductor. Esto hace que los iones de oro (Au^{3+}) sean reducidos a átomos de oro neutral (Au^0). A medida que más y más de estos átomos se forman, la solución se vuelve sobresaturada, y el oro poco a poco comienza a nuclear en forma de partículas nanométricas. El resto de los átomos de oro que se forman, se adhieren a las partículas existentes, y si la solución se agita con fuerza suficiente, las partículas serán bastante uniformes en tamaño (Figura 7) [18].

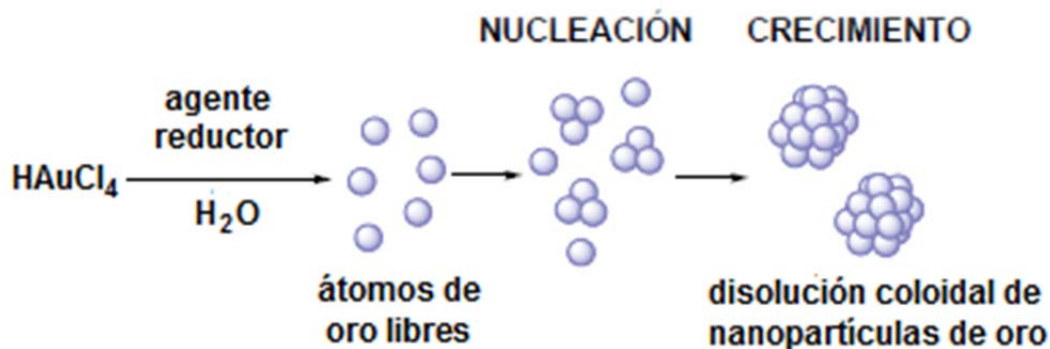


Figura 7. Esquema de la reducción de oro y formación de nanopartículas.

II.2.1.1 Método Turkevich

El método iniciado por J. Turkevich en 1951 y modificado por el Sr. G. Frens en 1970, es el más simple que hay disponibles. Generalmente, se utiliza para producir nanopartículas de oro esféricas monodispersas, suspendidas en agua, de diámetros alrededor de 10-20 nm. Las partículas más grandes se pueden producir, pero con esto se sacrifica la monodispersidad y forma. El método involucra la reacción de pequeñas cantidades de ácido cloraurico caliente con pequeñas cantidades de solución de citrato de sodio. El oro coloidal se forma porque los iones de citrato actúan como un agente reductor [19-22].

II.2.1.2 Método Brust

Este método fue desarrollado por Brust y Schiffrin en la década de 1990, y puede ser utilizado para producir nanopartículas de oro en líquidos orgánicos que normalmente no son miscibles con agua (como el tolueno). Se trata de la reacción de una solución de ácido cloraurico con bromuro de tetra-octilamonio (TOAB) una solución en tolueno y borohidruro de sodio como agente reductor y anticoagulante, respectivamente. Las nanopartículas de oro serán de alrededor

de 6.5nm. El NaBH_4 es el agente reductor, y TOAB es a la vez el catalizador de transferencia de fase y el agente estabilizador [23, 24].

II.2.1.3 Método Martin

Este método, descubierto por el grupo Eah en 2010, genera nanopartículas de oro "desnudo" en agua, mediante la reducción de HAuCl_4 con NaBH_4 . Incluso sin ningún otro tipo de estabilizador como citrato, las nanopartículas de oro se dispersan de forma estable. La distribución de tamaño es casi monodispersa y el diámetro puede ser preciso y reproducible de 3.2 a 5.2nm. La clave es estabilizar HAuCl_4 y NaBH_4 en la solución acuosa madre con HCl y NaOH durante más de 3 meses y más de 3 horas, respectivamente. Además, la relación de iones NaBH_4 -NaOH con los iones HAuCl_4 -HCl debe ser controlada con precisión [25].

II.3 Métodos de Caracterización

La observación es la clave para hacer nuevos descubrimientos, y esto es especialmente cierto en la nanoescala. En esta escala de tamaños, la observación se realiza con una sonda que puede consistir en fotones, electrones, neutrones, átomos, iones o incluso una punta atómicamente "afilada". Para los nanomateriales, la sonda a menudo tiene diferentes frecuencias, que van desde los rayos gamma a los infrarrojos o más allá, en el caso de los fotones, y hasta energías relativistas en el caso de las partículas. La información resultante puede ser procesada como imágenes, espectros, etc. que revelan los detalles topográficos, geométricos, estructurales, químicos o físicos del material. Una amplia gama de técnicas se encuentran disponibles para la caracterización de materiales, que puede ser usado para estudiar los nanomateriales.

Se utiliza un microscopio con el fin de observar los objetos con más detalle. La distancia que se puede resolver con instrumentos ópticos, sin tener en cuenta todas las aberraciones, es de aproximadamente 0.5λ , o del orden de 250nm. Todas las formas de microscopía están destinadas a mejorar nuestra capacidad visual. En condiciones ideales, el objeto más pequeño que el ojo puede analizar es de unos 0.07mm, este límite está relacionado con el tamaño de los receptores en la retina del ojo. Cualquier microscopio está diseñado para ampliar la imagen cayendo sobre la retina. La ventaja de un microscopio es que efectivamente trae el objeto más cercano al ojo. Esto nos permite ver una imagen magnificada con mayor detalle [26].

En la Figura 8 se observa un esquema de un microscopio electrónico de transmisión (MET) y un microscopio electrónico de barrido (SEM) comparados con un microscopio óptico y un tubo de rayos catódicos (CRT).

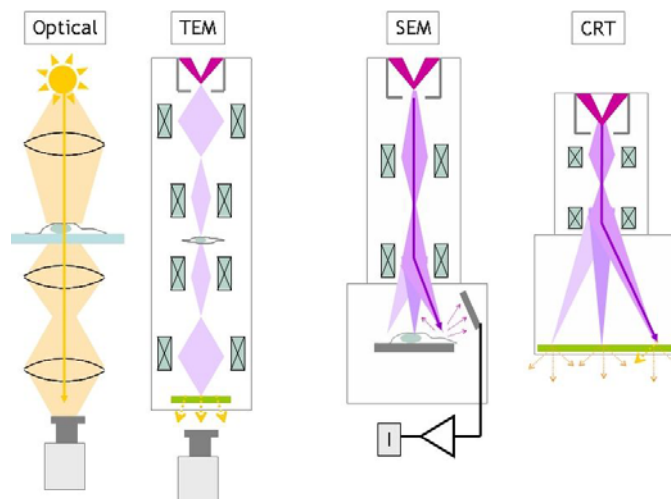


Figura 8. Esquema simple de un Microscopio Electrónico de Transmisión (MET) y microscopio electrónico de barrido (SEM) en comparación con un microscopio de transmisión óptica y un tubo de rayos catódicos (CRT), pantalla de TV - ambos sistemas tienen muchas partes en común con el microscopio electrónico [27].

Se encuentran disponibles varios tipos de microscopía para el estudio de los nanomateriales. Estos pueden agruparse en las siguientes categorías:

1. Microscopios ópticos
2. Microscopios electrónicos
3. Microscopios de sonda de barrido
4. Otros

II.3.1 Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM)

En TEM, los electrones transmitidos se utilizan para crear una imagen de la muestra. La dispersión se produce cuando el haz de electrones interactúa con la materia. La dispersión puede ser elástica (sin cambio de energía) o inelástica (con cambio de energía). La dispersión elástica puede ser a la vez coherente e incoherente (con y sin relación de fase) y ocurre a partir de arreglos de átomos bien ordenados como en un cristal, dando como resultado una dispersión coherente y patrones de punto. Esto puede ser en forma de anillos en el caso de un material policristalino. Sin embargo, también ocurre la dispersión inelástica, lo que también da las pautas regulares como en el caso de los patrones de Kikuchi. Los procesos inelásticos producen la absorción característica o emisión, específica al compuesto o elemento o estructura química. Debido a todos estos diversos procesos, un microscopio electrónico de transmisión es similar a un laboratorio completo [28, 29].

El sistema óptico-electrónico del microscopio electrónico de transmisión está constituido por las siguientes partes (el esquema se muestra en la Figura 9):

1. Cañón de electrones
2. Sistema de lentes
3. Pantalla fluorescente

Estos componentes están ensamblados en una columna vertical la cual se encuentra a alto vacío.

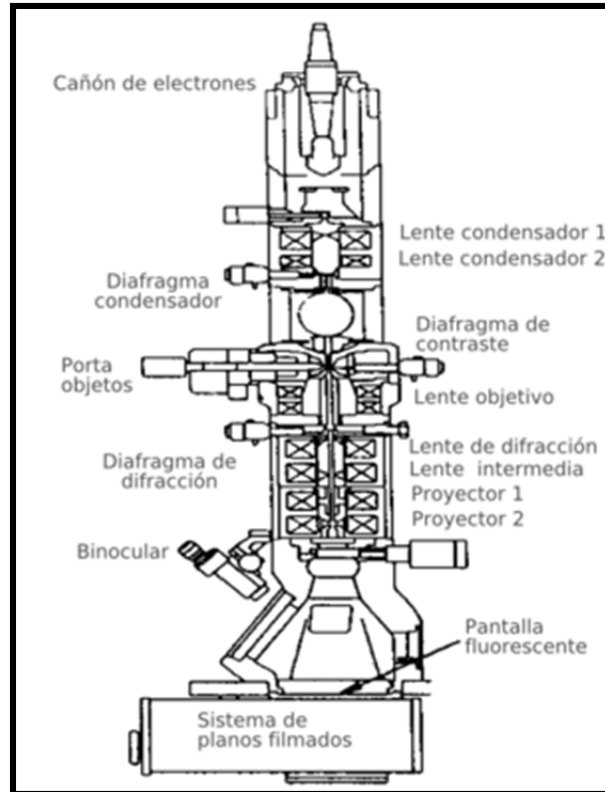


Figura 9. Esquema de un microscopio electrónico de transmisión (TEM) [30].

El cañón de electrones, es la fuente emisora del haz de electrones. Se encuentra ubicado en la parte superior de la columna. Está constituido por un filamento (cátodo), un cilindro con una apertura central, llamado cilindro de Wehnelt que rodea al filamento y tiene un potencial ligeramente más negativo que éste. El ánodo se encuentra por debajo del cilindro de Wehnelt.

El filamento es calentado (alrededor de 2800K) por el paso de corriente. Los electrones emitidos termoiónicamente por el cátodo son acelerados hacia el ánodo, pasan por la apertura circular central de éste y un haz de alta energía es emitido hacia la columna del microscopio.

El sistema de óptico está formado por lentes condensadoras, objetivas, intermedias y proyectoras. Las lentes condensadoras en los microscopios más modernos son dos. La primera proyecta el haz, punto de entrecruzamiento demagnificada (spot size), mientras que la segunda controla su diámetro y el ángulo de convergencia en que incide sobre la muestra, limita al haz que incide sobre la muestra.

La lente objetiva forma la primera imagen, localizada debajo del espécimen. Es considerada el componente más importante del microscopio electrónico. Cualquier defecto en ésta, será magnificado y transmitido al resto del sistema óptico. Por lo tanto, de ella dependen, en gran medida, la resolución final y la corrección de las aberraciones.

Las lentes intermedia y proyectora son las encargadas de amplificar la imagen dada por la lente objetivo y proyectarla sobre la pantalla fluorescente [31].

II.3.2 Espectrofotómetro ultravioleta-visible

El instrumento utilizado en la espectrometría ultravioleta-visible se llama espectrofotómetro UV-Vis. Mide la intensidad de luz que pasa a través de una muestra (I), y la compara con la intensidad de luz antes de pasar a través de la muestra (I_0). La relación I/I_0 se llama transmitancia, y se expresa habitualmente como un porcentaje (%T). La absorbancia (A) se basa en la transmisión:

$$A = -\log(\%T) \quad (1)$$

Las partes básicas de un espectrofotómetro son una fuente de luz (a menudo una bombilla incandescente para las longitudes de onda visibles, o una lámpara de arco de deuterio en el ultravioleta), un soporte para la muestra, una rejilla de difracción o monocromador para separar las diferentes longitudes de onda de la

luz, y un detector. El detector suele ser un fotodiodo o un CCD. Los fotodiodos se usan con monocromadores, que filtran la luz de modo que una sola longitud de onda alcanza el detector. Las rejillas de difracción se utilizan con CCDs, que recogen la luz de diferentes longitudes de onda en píxeles. La Figura 10 muestra una imagen de un espectrofotómetro UV-Visible.



Figura 10. Espectrofotómetro UV-Visible.

Las muestras para espectrofotometría UV-Vis suelen ser líquidas, aunque la absorbancia de los gases e incluso de los sólidos también puede medirse. Las muestras suelen ser colocadas en una célula transparente, conocida como celda (Figura 11). Las celdas suelen ser rectangulares, con una anchura interior de 1 cm. Esta anchura se convierte en la longitud de ruta, L , en la Ley de Beer-Lambert. También se pueden usar tubos de ensayo como celdas en algunos instrumentos. Las mejores celdas están hechas con cuarzo de alta calidad, aunque son comunes las de vidrio o plástico. El cristal y la mayoría de los plásticos absorben en el UV, lo que limita su utilidad para longitudes de onda visibles [32].

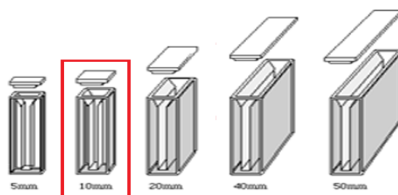


Figura 11. Diferentes tipos de celdas portamuestras.

II.4 Liofilización

La liofilización es un proceso de deshidratación que suele utilizarse para preservar un material perecedero o hacer al material más conveniente para el transporte. La liofilización trabaja a partir de la congelación de los materiales y la reducción de la presión del entorno para permitir que el agua congelada en el material se sublime, directamente de la fase sólida a la fase gaseosa. En la Figura 12 se muestra una imagen del liofilizador.

Hay cuatro etapas en el proceso de secado completo que son: pretratamiento, congelación, secado primario y secado secundario.



Figura 12. Imagen del liofilizador Free Zone Modelo 7750020 de LABCONCO.

II.4.1 Pretratamiento

Este incluye cualquier método de tratamiento del producto antes de la congelación. Esto puede incluir la concentración del producto, revisión de la formulación (es decir, la adición de componentes para aumentar la estabilidad y/o mejora de la transformación), la disminución de una alta presión de vapor de disolvente o el aumento de la superficie.

II.4.2 Congelación

En un laboratorio, esto se hace a menudo colocando el material en un matraz de liofilización y se introduce en un congelador llamado *Shell*, en donde el matraz se va rotando para enfriarse ya sea por refrigeración mecánica, hielo seco y metanol, o nitrógeno líquido. En una escala mayor, la congelación se hace generalmente usando una máquina de liofilización. En este paso, es importante enfriar el material por debajo de su punto triple, temperatura más baja a la cual las fases sólida y líquida del material pueden coexistir.

II.4.3 Secado primario

Durante la fase de secado primario, la presión es baja, y se suministra bastante calor al material para que el agua sublime. En esta etapa inicial de secado, aproximadamente el 95% del agua en el material se sublima. Esta fase puede ser lenta (puede ser de varios días en la industria), porque, si es añadido demasiado calor, la estructura del material puede ser alterada.

En esta fase, la presión se controla mediante la aplicación de vacío parcial. Además, las placas de una cámara de condensación fría y/o condensador proporcionan una superficie(s) para el vapor de agua, para volverlo a solidificar. Este condensador no juega ningún papel en el mantenimiento del material congelado, sino que impide que el vapor de agua llegue a la bomba de vacío, lo que podría degradar el rendimiento de la bomba. Las temperaturas del condensador son usualmente por debajo de -50°C .

Es importante señalar que, en este rango de presión, el calor es llevado principalmente por conducción o radiación, el efecto de convección se considera que es ineficiente.

II.4.4 Secado secundario

La fase de secado secundario tiene como objetivo eliminar las moléculas de agua no congelada, ya que el hielo fue eliminado en la fase primaria de secado. Esta parte del proceso de liofilización se rige por las isotermas de adsorción del material. En esta fase, la temperatura se eleva más alto que en la fase de secado primario, e incluso puede estar por encima de 0°C, para romper las interacciones físico-químicas que se forman entre las moléculas de agua y el material congelado. Por lo general, la presión se reduce también en esta etapa para alentar la desorción (típicamente en el rango de microbares, o fracciones de un pascal). Sin embargo, hay productos que se benefician del aumento de la presión también.

Al final de la operación, el contenido final de agua en el producto es muy baja, alrededor del 1 al 4% [33].

II.5 Matriz Cerámica

II.5.1 Dispersión en sólidos

Para hacer un uso eficiente de las propiedades físicas de las nanopartículas, se requiere, en muchas de las aplicaciones, que estas estén incorporados en materiales sólidos, tales como vidrios, cerámicos, óxidos, etc. Las inclusiones obtenidas de esta manera son protegidas de cambios por el medio ambiente tales como alteraciones químicas (oxidación) o mecánicas (fricción o desgaste). También están separadas unas de otras desde un punto de vista eléctrico o magnético, lo que limita todo tipo de interacción entre las partículas. La dispersión de las partículas dentro de materiales sólidos se puede lograr en forma ordinaria aprovechando los efectos de precipitación en el estado sólido (por ejemplo, el endurecimiento de aleaciones por dispersión de precipitados

nanométricos, las zonas de Guinier-Preston), y también por una gran cantidad de métodos menos directos. El método finalmente elegido depende de varios factores, tales como el tipo de la matriz, el tamaño, la forma y la organización espacial de las partículas, también el volumen de material que se produce, el costo y la dificultad involucrada en el proceso.

II.5.1.1 Métodos químicos

Los métodos químicos fueron los primeros en utilizarse para obtener dispersiones nanométricas en matrices y son los más desarrollados hoy en día para la síntesis de nanomateriales auto-organizados. En particular, proporcionan la mayor parte de los nanomateriales utilizados en óptica, donde las inclusiones de metal se incrustan a granel en vidrios o cerámicos de grosor variable. Hay dos tipos de métodos químicos convencionales principalmente: vidrios dopados y sol-gel.

II.5.1.2 Método Sol-Gel

El método de síntesis conocido como proceso Sol-Gel se ha desarrollado durante el siglo XX, hasta la fecha, tanto en los centros académicos de investigación y en la industria, produciendo vidrios por polimerización directa de precursores moleculares en solución, sin pasar por el estado de fundición.

La síntesis Sol-Gel se lleva a cabo en un medio líquido. Mediante la hidrólisis y condensación de precursores moleculares diluidos en un solvente se obtienen partículas sólidas dispersas en la fase líquida (el “sol”, una solución de partículas sólidas en un líquido). Estas dos reacciones químicas conducen a la formación de una estructura mesoporosa sólida hinchada con el líquido (“gel”), cuya porosidad puede ser controlada a escala nanométrica. Si un agente

orgánico tensioactivo se agrega al “sol” como agente estructurador (eliminado al final del proceso de calcinación), incluso es posible obtener super-redes monodispersas con tamaños de poros que se puede ajustar entre 1,5 y 10 nm, exhibiendo frecuentemente 2D o 3D. Aunque este es un proceso delicado para la fabricación de vidrios a granel, la viscosidad del gel se adapta bien a la fabricación de recubrimientos mesoporosos, con espesores de varios cientos de nanómetros en sustratos de diferentes formas y tipos (por ejemplo, vidrio, cerámica, metal, polímero) con revestimiento por inmersión, revestimiento por centrifugación, o técnicas de pulverización. Estos revestimientos por lo general se secan a temperatura ambiente, lo que lleva a un gel seco transparente o xerogel, cuya densificación a temperaturas moderadas produce un vidrio con características similares a un vidrio convencional [34].