

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**Diseño de un sistema fotocatalítico para la
eliminación de colorantes usando óxidos
mixtos.**

T E S I S P R O F E S I O N A L

Presentada para obtener el título de:

LICENCIATURA EN INGENIERIA QUÍMICA

Presenta:

Geegee Alejo Díaz

Directora de Tesis:

Dra. Esmeralda Vidal Robles

Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.

Noviembre, 2019



BUAP

CONTENIDO

Contenido.....	1
Lista de figuras.....	3
Lista de Tablas.....	4
Introducción.....	5
Objetivos.....	6
Objetivos General.....	6
Objetivos Específicos.....	6
Hipótesis.....	6
Capítulo 1 Marco Teórico.....	7
1.1 Contaminación de Aguas Residuales.....	7
1.2 Colorantes.....	8
1.2.1 Colorantes Azoicos.....	8
1.2.2 Naranja de Metilo.....	9
1.3 Mecanismos para la degradación de contaminantes.....	10
1.3.1 Tratamientos preliminares.....	10
1.3.2 Tratamientos Biologicos.....	10
1.3.3 Tratamientos terciarios o Avanzados.....	10
1.3.4 Procesos de Oxidación Avanzada (POA).....	10
1.4 Fotocatálisis Heterogénea.....	12
1.5 Semiconductores o Fotocatalizadores.....	14
1.5.1 El TiO_2 como Fotocatalizador.....	15
1.5.2 El ZnO como Fotocatalizador.....	16
1.6 Síntesis por Método sol-gel.....	17
1.7 Fotorreactores.....	19
1.8 Diseño Asistido por computadora.....	19
1.8.1 Diseño en Ingeniería.....	20
1.8.2 Solidworks.....	21
1.8.3 CATIA.....	22
1.8.4 Ventajas y Desventajas entre Solidwork y CATIA.....	23
Capítulo 2 Metodología.....	25
2.1 Análisis por Difracción de Rayos X (DRX).....	25
2.2 Síntesis y Caracterización del composito TiO_2	26
2.2.1 Procedimiento para la síntesis del composito TiO_2	27
2.2.2 Procedimiento para la síntesis del composito ZnO	28
2.2.3 Procedimiento para la síntesis del composito TiO_2/ZnO	29
2.3 Metodología para el Diseño del Fotorreactor.....	31
2.4 Metodología para el monitoreo de la temperatura dentro del fotorreactor.....	31

Capítulo 3 Resultados.....	32
3.1 Caracterización del TiO ₂ por Difracción de RX.....	32
3.2 Caracterización del ZnO por Difracción de RX.....	38
3.3 Diseño del Fotorreactor.....	42
3.4 Sistema de Monitoreo de Temperatura.....	44
Conclusiones y recomendaciones.....	49
Apéndice 1.....	50
Partes del Fotorreactor.....	50
Ensamblado.....	54
Producto Final.....	56
Drafting.....	56
Bibliografía.....	58

Lista de Figuras

Fig. 1.1 Grupos Azo.....	5
Fig. 1.2 Naranja de Metilo.....	6
Fig. 1.3 Formula naranja de metilo.....	6
Fig. 1.4 Función del semiconductor.....	12
Fig. 1.5 Estructuras del TiO ₂ fases cristalinas.....	13
Fig 1.6 Estructuras del ZnO fases critalinas.....	14
Fig 2.1 Equipo de difracción de Rayos X.....	23
Fig. 2.2 a) catalizador TiO ₂ , b) catalizador ZnO.....	27
Fig 3.1 Espectro de Difracción de Rayos X (DRX) de TiO ₂	29
Fig 3.4 Interfase del software Mercury.....	32
Fig. 3.5 Difractograma de TiO ₂ fase anatasa de la base de datos American Mineralogist Structure.....	33
Fig 3.7 Espectro de Difracción de Rayos X (DRX) de ZnO.....	35
Fig. 3.11 Difractograma de ZnO de la base de datos American Mineralogist Structure.....	38
Fig 3.12 Esquema del Fotoreactor, a) Diseño de Tubos concéntricos, b) Sección transversal del fotoreactor, c) Esquema del fotoreactor.....	40
Fig. 3.13 Diseño del reactor Fotocatalítico utilizando el software CATIA.....	41
Fig 3.14 Placa Arduinio Uno.....	42
Fig 3.15 Sensor de Temperatura.....	42
Fig 3.16 Placa protoboard y resistencias.....	42
Fig 3.17 Archivo Zip de la librería.....	43
Fig 3.18 Configuración de conexión del sensor de Temperatura.....	43
Fig 3.19 Algoritmo ejecutado del sensor de temperatura.....	45

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Tecnologías Avanzadas de Oxidación.....	9
Tabla 3.2 Índice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina.....	30
Tabla 3.3 Base de datos de Antasa	31
Tabla 3.6 Índice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina reportados en la base de datos American Mineralogist Structure.....	34
Tabla 3.8 Índice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina de ZnO.....	36
Tabla 3.9 Base de datos de ZnO.....	37
Tabla 3.10 Índice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina reportados en la base de datos American Mineralogist Structure.....	37

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la gran cantidad de aguas residuales vertidas por las empresas con desechos altamente tóxicos, han ocasionado un gran deterioro ambiental en el aire, aguas y suelo. La industria textil, por ejemplo produce anualmente grandes cantidades de efluentes cargados de colorantes, que generalmente son tóxicos y altamente resistentes a la degradación biológica.

La producción de colorantes sintéticos es de más de 7×10^5 toneladas cada año, únicamente a través de efluentes de residuos textiles, alrededor de un millón de colorantes textiles no biodegradables se descargan en cuerpos de agua y corrientes naturales. Por lo tanto, con las crecientes preocupaciones ambientales y la conciencia ambiental, existe la necesidad de eliminar los colorantes de los efluentes de agua locales e industriales con una tecnología rentable [1].

La contaminación y falta de tratamiento funcional al agua resulta en un grave problema para el suelo que se encuentra en contacto con cuerpos de agua contaminados, flora y fauna alimentada por la misma, y seres humanos que entran en contacto con ella.

Entre los métodos conocidos para la degradación de colorantes de efluentes se encuentra la coagulación, electrocoagulación, adsorción en carbón activado, y solución de ozono para recuso de agua [2-3]. Sin embargo, dichos métodos solo transfieren el colorante a una fase distinta, por lo que el problema persiste, llevando a la necesidad de emplear métodos que mineralicen por completo los colorantes. Entre las tecnologías prometedoras para la reducción de este problema se encuentra la fotocatalisis. La fotocatalisis heterogénea es efectiva para la realización de la fotooxidación de una gran variedad de contaminantes orgánicos presentes en los efluentes. La utilización de TiO_2 como fotocatalizador para la fotodegradación de contaminantes orgánicos en agua es un tópico relevante de aplicación, también ha probado su eficiencia en degradación de compuestos contenidos en aire y suelo [4].

El TiO_2 es el fotocatalizador más usado, por su elevada estabilidad térmica, actividad y bajo costo, sin embargo, es de gran interés la preparación de estos medios que permitan maximizar el área específica, y obtener un mejor control de la estructura anatasa.

El método de preparación influye significativamente sobre la morfología, estructura, superficie, fases cristalinas, fisicoquímica y propiedades electrónicas que están relacionadas con su fotoactividad.

En este proyecto se diseñó un fotorreactor para la degradación de colorantes utilizando como catalizador el compuesto TiO_2/ZnO , el cual consiste en un prototipo con tubos concéntricos colocados en un doble colector parabólico. Se prepararon los catalizadores por la técnica sol-gel. El reactor se diseñó en el software de modelado en 3D Solidworks® y CATIA. Para controlar las variables involucradas en el proceso de degradación, se programaron sensores utilizando para su control las plataformas Arduino® y Python®.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema fotocatalítico utilizando software CAD e implementación de un sistema de monitoreo utilizando sensores de temperatura para la eliminación del colorante Naranja de metilo utilizando catalizadores ZnO y TiO_2 .

Objetivos Específicos

1. Síntesis del compuesto TiO_2/ZnO mediante la técnica de sol gel.
2. Caracterización del compuesto TiO_2/ZnO mediante XRD.
3. Diseño del reactor fotocatalítico en formato CAD (Diseño asistido por computadora) en CATIA.
4. Implementación de un sistema de monitoreo de temperatura usando las plataformas Arduino y Python.

Hipótesis

El diseño de un reactor fotocatalítico de colectores parabólicos utilizando software CAD y un sistema de monitoreo usando las plataformas Arduino y Python, permitirá obtener un diseño preciso del reactor y datos en tiempo real de la variable temperatura.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Contaminación de Aguas Residuales

La contaminación es últimamente uno de los temas que debería preocupar a la población para tomar acciones y tratar de revertir los daños que hemos ocasionado al medio ambiente y sus fuentes naturales.

Los grandes problemas de contaminación se presentan primero en naciones muy industrializadas y con concentraciones urbanas considerables.

Para poder entender el problema de la contaminación en las aguas, deberíamos primero tomar como definición de aguas residuales a cualquier agua cuya calidad se ha visto afectada por composiciones variadas de descargas domésticas, industriales, comerciales, agrícolas, de plantas de tratamiento, etc.

Las aguas residuales se pueden clasificar de acuerdo con su origen, pues este determinara la composición del agua, y entre los más contaminantes son los urbanos e industriales.

La problemática actual de los ríos es el resultado del deterioro producido por la expansión demográfica y el desarrollo económico de los estados. En los últimos 25 años diferentes estudios han caracterizado la calidad del agua de los ríos y de las zonas de impacto a su alrededor, determinando las condiciones y el riesgo que representan las descargas depositadas en ellos [1].

Las industrias son importantes debido a la alta generación de ingresos y también fuertes generadoras de contaminación en las aguas, causando daños a la salud en comunidades aledañas y lugares de los desechos. La industria textil, entre otras, es una de las que más consumen agua en su proceso y por lo que más desechos contaminantes tiene. Esto debido a los colorantes que se usan en el proceso, ya que en la actualidad los colorantes son fabricados, muy solubles en agua, pero difíciles de disolver.

La presencia de colorantes en la industria textil es principalmente que, durante el proceso de acabado de tela e hilos, específicamente en el teñido, el colorante no se fija completamente y se desechan del 12 al 30% de residuos de colorante, dependiendo el tipo

y proceso de fijación. Estos colorantes más el agua residual que se genera en el proceso, será el que demerita la calidad de agua para su desecho [2]

1.2 Colorantes

En la historia y desde las primeras civilizaciones, el hombre ha utilizado colorantes. Los primeros pigmentos eran de origen natural, extraídas de plantas, insectos y minerales. Los colorantes han estado asociados a las manifestaciones culturales de distintas civilizaciones.

El hombre a lo largo del tiempo ha logrado la extracción de nuevos colorantes, así como sus técnicas de extracción y tinción. Es así como se ha favorecido la obtención nuevos producto, que ha permitido aumentar la gama de colores [3].

Los colorantes se usan para teñir ropa, pintar pieles, fabricar objetos decorativos y de recreación. Estos son capaces de teñir fibras vegetales y animales.

Para que un colorante sea útil, debe ser capaz de unirse fuertemente a la fibra, por lavado no deberá perder su color, debe ser químicamente estable y soportar la acción de la luz [4].

Los colorantes se pueden clasificar de acuerdo con su origen, naturales o sintéticos. Los sintéticos han reemplazado en su mayoría a los naturales, ya que cuentan con una gama de colores diversas.

1.2.1 Colorantes azoicos

Se caracterizan por presentar por lo menos un grupo azo (Fig. 1.1) en su estructura, estos están unidos a grupos aromáticos, los cuales los hacen muy estables [5]

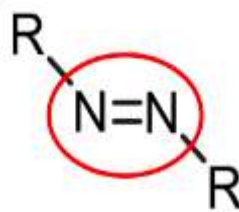


Fig. 1.1 Grupos Azo

Estos colorantes son usados en la industria por que pueden proporcionar diferentes tonalidades, y se humectan fácilmente en las fibras.

En algunos lugares del mundo la venta de estos colorantes es prohibida, debido a que algunos son tóxicos y mutagénicos, es decir que puede alterar o cambiar la información genética por encima del nivel natural, sin embargo, son utilizados debido a su bajo costo, mayor capacidad de tinción, buena permanencia en las fibras y variedad de colores [5].

1.2.2 Naranja de Metilo

El naranja de metilo tiene un aspecto sólido, de color anaranjado-amarillento y no tiene olor Fig. (1.2).



Fig. 1.2 Naranja de metilo

Es utilizado como colorante en la industria textil y además como un indicador ácido-base. Se han realizado estudios que han demostrado que esta sustancia no es biodegradable cuando está presente como contaminante en las aguas residuales debido a su baja solubilidad [6].

Por la contaminación y el uso de colorantes (Fig. 1.3), se ha requerido de estudios de tecnología para la degradación de colorantes en aguas contaminadas.

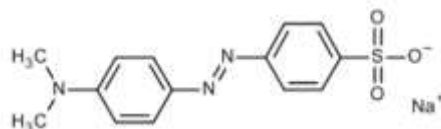


Fig. 1.3. Fórmula Naranja de metilo

Debido a la falta de tratamiento de las aguas residuales, urbanas y sobre todo las provenientes de las industrias, después de las muchas crisis de salud de las poblaciones y el deterioro del medio ambiente en muchas partes del mundo, la preocupación aumenta y se promueve el tratamiento de dichas aguas.

1.3 Mecanismos para la degradación de contaminantes

Los tratamientos de aguas residuales, es un proceso que incluye transformaciones físicas, químicas y biológicas con la razón de remover los contaminantes provenientes del uso humano. El objetivo es producir agua limpia o reutilizable en el ambiente.

Para dar este tratamiento al agua, se requiere de cierto proceso.

1.3.1 Tratamientos Preliminares

Estos procesos solo tienen como objetivo disminuir la carga sólida de gran tamaño y se basan fundamentalmente en procesos de coagulación y floculación de la materia en suspensión para su posterior decantación [7] [8].

1.3.2 Tratamientos Biológicos

Son tratamientos biológicos que degradan o coagulan mediante microorganismos y remueven los compuestos sólidos y materia orgánica [7].

1.3.3 Tratamientos terciarios o Avanzados

Estos tratamientos se han desarrollado debido a la necesidad de tener agua residual de mayor calidad. Tienen como objetivo la eliminación de materia orgánica u otros contaminantes que permanecen en el agua tras los procesos principales [7].

1.3.4 Procesos de Oxidación Avanzada (POA)

Se ha visto la necesidad de seguir trabajando nuevas y mejores tecnologías, que nos lleven al manejo adecuado y completo de los residuos.

Existen variedades de POA algunos utilizan ozono, radiación UV, peróxido de hidrogeno con radiación ultravioleta y la fotocatalisis heterogénea, en la que emplea un semiconductor [9].

Las ventajas de los POA [10].

- ✓ Capacidad potencial para llevar a cabo una profunda mineralización de los contaminantes orgánicos y oxidación de los compuestos inorgánicos hasta dióxido de carbono e iones (cloruros, nitratos).
- ✓ Reactividad con la mayoría de los compuestos orgánicos, hecho principalmente interesante si se quiere evitar la presencia de subproductos

potencialmente tóxicos presentes en los contaminantes originales que pueden crearse mediante otros métodos.

- ✓ Descomposición de los reactivos utilizados como oxidantes en productos inocuos.
- ✓ Generalmente se consigue la mineralización completa del contaminante. En cambio, las tecnologías convencionales, que no emplean especies muy fuertemente oxidantes, no alcanzan a oxidar completamente la materia orgánica.
- ✓ Son muy útiles para contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- ✓ Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.
- ✓ Generalmente, mejoran las propiedades del agua tratada.
- ✓ En muchos casos, consumen mucha menos energía que otros métodos.

Estos procesos se clasifican en fotoquímicos y no fotoquímicos.

Tabla 1.1 Tecnologías Avanzadas de Oxidación

Procesos fotoquímicos	Procesos no fotoquímicos
Oxidación en agua sub/y supercrítica	Ozonización en medio alcalino (O_3/OH^-)
Fotólisis del agua con irradiación del Ultra Violeta de Vacío (UVV)	Ozonización con peróxido de hidrógeno (O_3/H_2O_2)
Irradiación UV con peróxido de hidrógeno (UV/ H_2O_2)	Procesos Fenton (Fe^{2+}/H_2O_2) y relacionados
Irradiación UV en presencia de Ozono (UV/ O_3)	Radiólisis y tratamiento con haces de electrones
Foto- Fenton y relacionadas (Fe^{2+}/UV)	Oxidación electroquímica
Procesos fotoquímicos	Plasma no térmico
Fotocatálisis heterogénea	Descarga electrohidráulica- Ultrasonido

Fuente, Martínez (2010)

Se ha estudiado la degradación de los colorantes para la reducción de la contaminación en aguas residuales, entre los procesos están los procesos de reducción y oxidación mediados por fotocatalizadores. Este proceso es interesante ya que la degradación ocurre en cualquier grado de concentraciones de colorante.

Los POA (Procesos de Oxidación Avanzada), cambian al contaminante, y logran la mineralización completa. Dentro de estos procesos esta la fotocatálisis heterogénea, este proceso ha sido investigado últimamente por sus buenos resultados y su facilidad de utilización.

1.4 La Fotocatálisis Heterogénea.

De las primeras referencias que mencionan la fotocatálisis datan de 1910 [11].

En la década de los 60's se registran estudios de foto-adsorción y desorción del oxígeno, de la oxidación del CO con el uso del ZnO y se demostró que el TiO₂ era sensible a la luz. También se tienen estudios de la foto-electrólisis del agua con el uso del TiO₂ y luz UV [12].

A finales de la década de los 80's y principios de los 90's se planteó la aplicación de estos tratamientos, por la preocupación de los problemas ambientales, a finales de los 90 se estudiaron las limitantes del tratamiento en la generación de radicales hidroxilo en altas concentraciones y la baja velocidad del proceso para la degradación global del contaminante [12] [13].

Para finales del siglo XX se realizaron cerca de 2000 publicaciones con alrededor de 1000 artículos por año respecto a la fotocatálisis heterogénea, tecnología que se ha vuelto emergente para el tratamiento de varios contaminantes, en la actualidad se le ha encontrado viable y competitivo dentro de las aplicaciones específicas [12][13].

Los métodos convencionales primarios y secundarios no logran la eliminación total del color y toxicidad característico de ciertos efluentes por lo que se aplican procesos de oxidación avanzada (POA). [13].

Mediante la aplicación de estos tratamientos se pueden tratar efluentes que contengan colorantes, surfactantes, fenoles, compuestos orgánicos clorados, ácidos orgánicos,

estrógenos, productos farmacéuticos, compuestos como el pentacloro fenol que es un preservador de la madera, residuos de limpieza de tanques portuarios (percloroetileno, tricloroetileno, fenoles, entre otros), iones metálicos, cianuros, plaguicidas, pesticidas, herbicidas, toxinas, además para la limpieza de suelos contaminados que se puede realizar en fase acuosa y gaseosa dependiendo de la técnica aplicada y de la naturaleza de los contaminantes. [13][14] [15]

Existen varias tecnologías que utilizan luz para la generación de radical OH, entre las principales se pueden mencionar la fotólisis, foto-fenton, y la fotocatalisis heterogénea. [16]

La fotocatalisis heterogénea consiste en la degradación del contaminante a través de la utilización de catalizadores (óxidos semiconductores), radiación ultravioleta y/o solar, los cuales son responsables de la oxidación de dichos contaminantes [17]. Este es un proceso de oxidación avanzada (POA), y llega a ser sostenible en el futuro debido a su posible uso de la radiación solar como energía, lo cual da un avance para el medio ambiente. Sin embargo, también se puede utilizar luz artificial con una sola longitud de onda que haga que el semiconductor se active para realizar su función.

Se entiende por fotocatalisis heterogénea un proceso en el cual un catalizador semiconductor, acelera la reacción de descomposición de un contaminante gracias a la acción de la luz natural o artificial.

En la fotocatalisis heterogénea se llevan a cabo reacciones oxido-reducción, que se realiza a través del semiconductor de banda ancha. La activación del semiconductor puede ser directa o indirecta para la adsorción de energía, el cual ayudara dar origen a la destrucción de los contaminantes.

Las características principales de la fotocatalisis heterogénea son:

- a) Se presenta más de una fase, ya que el semiconductor es sólido.
- b) Generalmente los productos son líquidos.
- c) La reacción ocurre en la interfase del semiconductor.
- d) Los semiconductores deberán tener un area superficial grande, para maximizar el area de contacto.

En el proceso de la fotocatalisis heterogénea se toman en cuenta factores principales para optimizar el proceso dentro del reactor, como el mayor aprovechamiento de la radiación de la luz y el mayor contacto con el catalizador.

Las investigaciones iniciales de la fotocatalisis se hicieron con reactores de lámparas UV; ya que ayuda a controlar las condiciones experimentales, además de representar radiaciones continuas en longitudes de onda deseadas. El hecho de que las fuentes artificiales de luz proporcionen radiación continuamente en las longitudes de onda deseadas, hace que en muchas ocasiones se prefiera esta fuente de luz a la solar. [16].

1.5 Semiconductores o Fotocatalizadores

Los semiconductores son elementos con conductividades eléctricas intermedias entre conductores y aislantes, que pueden absorber luz de ciertas longitudes de onda y presentan actividad fotocatalítica. Una de sus principales características es la presencia de dos bandas energéticas en su estructura; una con baja energía y otra con alta energía [18].

Para el empleo de un semiconductor en un proceso catalítico este debe ser estable, fotoactivo, inerte, no toxico, absorber luz en la región visible y/o UV, adaptarse a varios ambientes, resistencia al envenenamiento, estabilidad mecánica y bajo costo. Algunos semiconductores que cumplen estas condiciones son: TiO_2 , CdS , SnO_2 , WO_3 , SiO_2 , ZrO_2 , ZnO , Nb_2O_3 , Fe_2O_3 , y SrTiO_3 . [19]

Los semiconductores que se utilizan en la fotocatalisis se comportan como conductores de energía cuando los fotones llegan a la superficie del material, provocando así movilidad de electrones a través de su banda de valencia (reductora), a la banda de conducción (oxidante), entre estas bandas existe una banda de energía prohibida, para los electrones (banda gap). Esto hace que se genere el par hueco-electrón Fig 1.4.

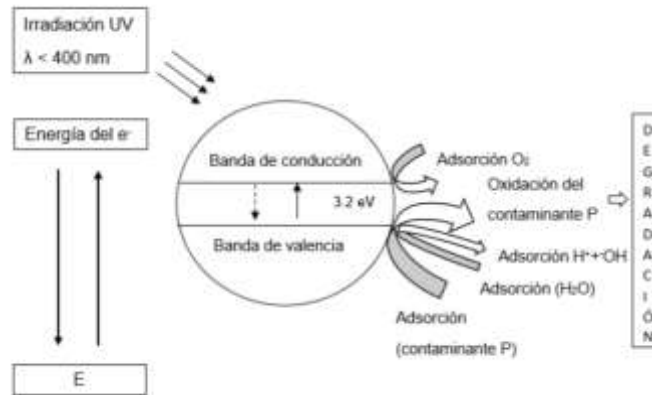


Fig. 1.4 Función del semiconductor

Existen muchos materiales con las propiedades requeridas para llevar a efecto reacciones fotosensibilizadoras, ya que son materiales de fácil adquisición, baratos, se pueden sintetizar fácilmente. La mayoría de estos materiales se activan con luz de no muy alta energía y una de sus mayores ventajas es que pueden absorber la luz solar.

1.5.1 El TiO₂ como Fotocatalizador

Como se ha mencionado anteriormente, se han empleado en la fotocatalisis muchos semiconductores, pero, el semiconductor que más ha despertado interés en su estudio y utilidad es el TiO₂, tiene un bajo costo, actividad fotocatalítica relativamente alta, tiene estabilidad química.

El Dióxido de titanio es un mineral natural (TiO₂). Este elemento es de gran importancia y muy utilizado en muchos sectores por sus propiedades de dispersión, su estabilidad biológica y química, su no toxicidad, su costo reducido y por ser apto para trabajar en un amplio rango de PH. De hecho, es el pigmento inorgánico más importante en términos de producción mundial. A demás también es utilizado como bloqueador solar, en cosmética, en comprimidos vitamínicos, etc.

El TiO₂ Se presenta en tres formas cristalinas: anatasa (estructura octaédrica), rutilo (estructura tetragonal) y broquita (estructura ortorrómbica) ver Fig. (1.5), siendo las dos primeras las más comunes y la anatasa la más abierta y más efectiva en el proceso de fotocatalisis para el tratamiento de aire contaminado [20]

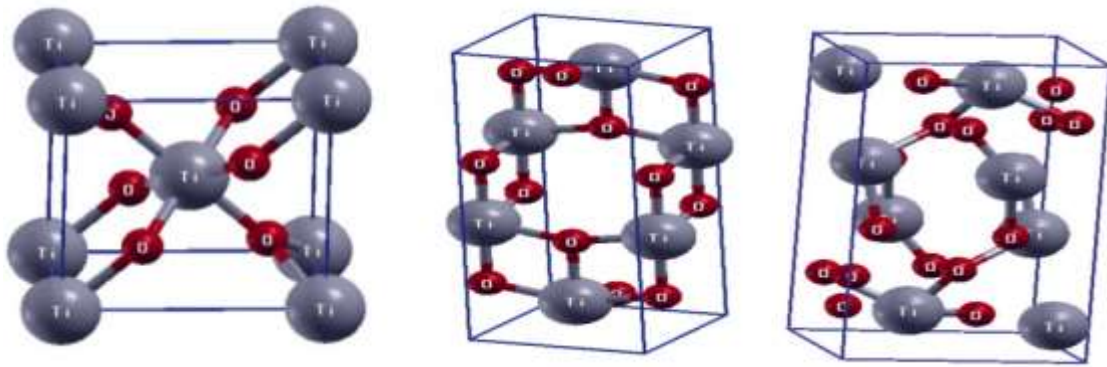


Fig. 1.5 Estructuras del TiO₂ fase cristalinas:

- a) broquita (estructura ortorrómbica), b) anatasa (estructura octaédrica), c) rutilo (estructura tetragonal)

El dióxido de titanio (TiO₂) es uno de los semiconductores más investigados en los procesos de oxidación avanzada, debido a que éste posee propiedades fotoconductoras y fotocatalíticas que lo presentan como uno de los óxidos de mayor impacto en la degradación de colorantes. [21].

El TiO₂ tiene propiedades que lo hacen muy útil:

Es un fotocatalizador muy eficaz acelerando las reacciones químicas provocadas por la radiación luminosa. Es un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética cerca de la región UV, no es atacado por la mayoría de agentes orgánicos e inorgánicos. Se disuelve en ácido sulfúrico caliente y en ácido hidrófluorhídrico [22]

1.5.2 El ZnO como Fotocatalizador

El óxido de zinc es un compuesto químico que en su forma natural es un polvo blanco y fino. Se considera como uno de los mejores fotocatalizadores por su alta estabilidad química, alta actividad fotocatalítica a temperatura ambiente, además de ser barato y no tóxico [23].

El ZnO como semiconductor se considera muy cercano al catalizador ideal. Este óxido es relativamente barato y produce huecos fotogeneradores con un alto poder oxidativo, debido a su energía de banda prohibida. Su mayor ventaja como fotocatalizador es que absorbe una amplia región de espectro, lo cual hace posible la oxidación fotocatalítica en presencia de luz solar.

Como la mayoría de los compuestos semiconductores, el ZnO cristaliza en tres estructuras cristalinas: estructura cúbica tipo NaCl, blenda de zinc y hexagonal tipo wurtzita (Fig.1.6). En condiciones normales de presión y temperatura, la fase termodinámicamente estable es la fase hexagonal tipo wurtzita [24]

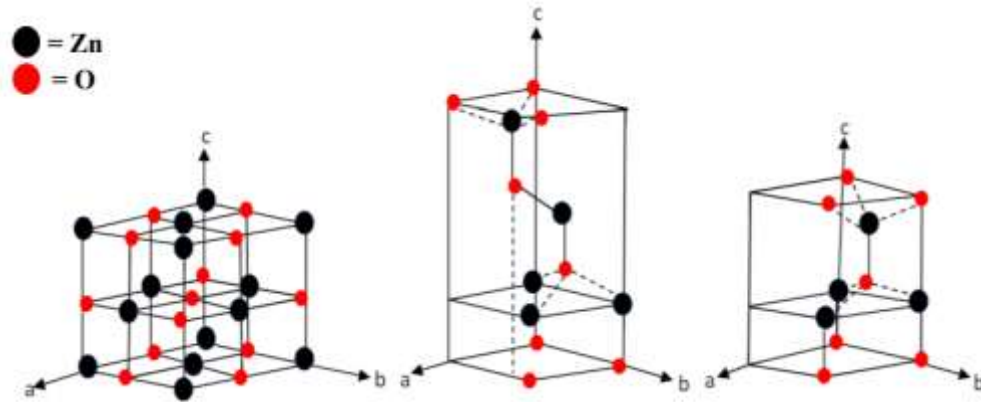


Fig. 1.6 Estructuras del ZnO fase cristalina

a) cúbica tipo NaCl, b) cúbica tipo blenda de zinc, c) hexagonal tipo

Estos semiconductores TiO_2 y ZnO son polvos los cuales para su utilidad en la fotocatalisis se requieren nanopartículas.

1.6 Síntesis por Método Sol-gel

Un catalizador es una sustancia que incrementa la velocidad a la que una reacción química se aproxima al equilibrio, sin aparecer en el producto final y sin desaparecer durante la reacción. Un catalizador puede también modificar la distribución de productos (selectividad). Normalmente, los catalizadores proporcionan un mecanismo que involucra un estado de transición diferente al del proceso no catalizado y una menor energía de activación [25].

Los métodos que comúnmente se utilizan para sintetizar óxidos mixtos son: sol-gel, co-precipitación y deposición química de vapor [26]

El método sol-gel se ha convertido en una de las técnicas más usadas para sintetizar óxidos mixtos. Han sido de mucho interés para la investigación debido a sus posibles aplicaciones en catálisis y óptica. [27]

Una gran diversidad de materiales puede ser obtenidos cambiando la composición de solución de síntesis y/o el tratamiento térmico. A su vez, existen parámetros que influyen la estructura y las propiedades del material obtenido tales como la naturaleza del precursor, la relación molar, la naturaleza del solvente y el uso de agentes modificantes.[28] Este método presenta ventajas con respecto a los tradicionales, debido a que se obtiene mayor homogeneidad de los productos de partida, temperaturas de síntesis muy bajas lo que permite ahorrar energía y minimizar pérdidas por evaporación y mayor homogeneidad y pureza de los productos finales.

El método sol-gel es el más empleado dada su capacidad para controlar las propiedades texturales y de superficie de óxidos compuestos. Este método se basa en reacciones de hidrólisis y policondensación de un alcóxido de un metal, para producir óxidos puros y homogéneos, cuidando ciertos parámetros de síntesis, entre ellos la etapa de hidrólisis [29].

El método sol-gel es la transición de un estado líquido (sol), a una fase sólida (gel) [30]. De las reacciones más importantes que se llevan a cabo durante la formación de sol a gel, son las de hidrólisis y condensación [31].

Tres métodos se usan para la síntesis por sol-gel [30]:

1. método uno, gelación de una solución de polvos coloidales;
2. método dos, hidrolisis y policondensación de precursores como alcóxidos y nitratos seguidos por un secado hipercrítico del gel
3. método tres, hidrolisis y policondensación de precursores alcóxidos seguidos por el envejecimiento y secado a temperatura ambiente.

1.7 Fotorreactores

Para realizar las reacciones fotocatalíticas se requiere de un fotoreactor donde la geometría y los materiales deben favorecer una absorción eficiente de los fotones que inciden en el sistema, evitando que una iluminación insuficiente limite la reacción [32]

El diseño de un fotoreactor puede contemplar distintas alternativas, que van en función de la aplicación y la escala:

Fuente de irradiación: Luz artificial o solar

Modo de operación: discontinuo o continuo

Escala: Laboratorio, piloto o industrial

Disposición del fotocatalizador: Soportado/inmovilizado o en suspensión

Estos parámetros juegan un papel importante en el resultado final.

1.8 Diseño Asistido por Computadora

El avance tan impactante del software y hardware, en estos últimos años ha modificado la forma de entender el concepto de CAD, se entiende como el diseño asistido por computadora (Computer Aided Desing). Esto permite que en las tecnologías mejoren su productividad, calidad y oportunidad, de manera que se dedica mayor tiempo a la mejora de los diseños.

Desde 1963 Ivan Sutherland del MIT (Massachussets Institute of Technology) publicó su tesis doctoral sobre graficas interactivas por computadora definiendo la topología del objeto (sistema Sketchpad - SUTH63) la tecnología CAD se ha desarrollado con la limitante del tiempo de proceso [33]

La aplicación del software CAD en la ingeniería abarca la elaboración de diagramas de diversos tipos, gráficos estadísticos, representación normalizada de piezas para su diseño y fabricación, representación tridimensional de modelos dinámicos en multimedia, aplicaciones en realidad virtual, robótica, etc.

Los software CAD se pueden usar en dos maneras generales [33]:

- Lenguajes de programación: un amplio dominio, conocimiento de las tecnologías de exhibición, manejo del análisis matemático, geométrico y vectorial.

- Paquetes aplicativos: debido a su amplio desarrollo acelerado, su especialización en los diferentes campos de aplicación, su diseño de arquitectura abierta y su facilidad de uso han permitido su rápida aceptación y adopción.

El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto aun antes de que se haya construido. Los dibujos en papel pueden no ser necesarios en la fase del diseño.

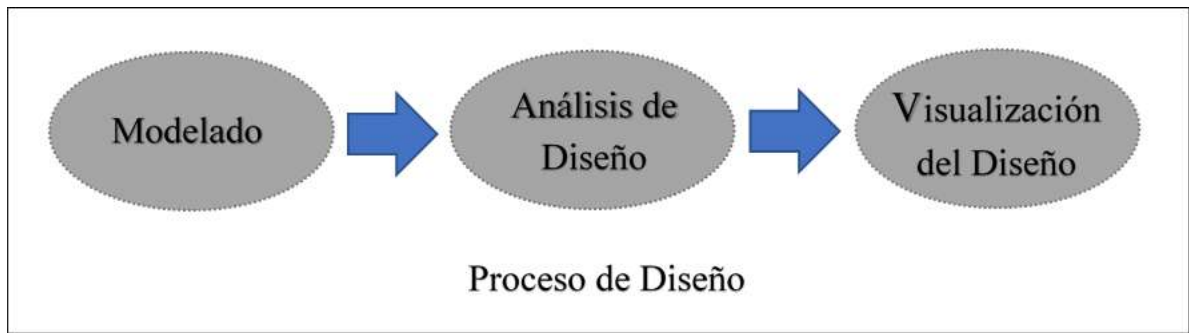
1.8.1 Diseño en Ingeniería

En la ingeniería el dibujo, ha sido desarrollado a través de ideas y por la solución a los problemas tecnológicos, y por ello es necesario la utilidad de conocimiento y nuevos recursos de productor ya existentes para satisfacer las necesidades demandadas. En el desarrollo de un producto o el proceso y, se ocupan las herramientas de diseño para aplicar los principios de ingeniería, tomando en cuenta restricciones, funcionalidades, para esto también se requiere información y conocimiento de las áreas a aplicar.

El modelado es el proceso de representación de ideas abstractas, palabras y formas a través del empleo ordenado de texto e imágenes simplificadas con el objeto de generar un prototipo digital y comunicar, documentar, analizar y visualizar el proceso de diseño [33].

El análisis de diseño es la parte del proceso en donde ya se tiene el concepto, ahora se aplican propiedades, mecanismos, funcionalidad y los recursos humanos que adquiere el proceso.

Visualización del diseño, en paso del proceso se observan los planos y características de las piezas del proceso, un esquema foto realista y su representación gráfica.



El modelo debe representar lo mejor posible la realidad, y luego aplicar métodos matemáticos para darle la forma y disposición adecuada para poder obtener resultados numéricos. El diseñador debe determinar si el modelo de computadora satisface o no el criterio de diseño, y debe ser capaz de leer el dibujo, comprender su forma, tamaño e información relativa a su fabricación [33].

1.8.2 Solidworks ^[34].

En 1993, el fundador de SOLIDWORKS, Jon Hirschtick, desarrolló la primera tecnología de CAD en 3D que se ejecutaba en la plataforma de Windows. En el año 1995 lanzaron su primera versión del CAD 3D al mercado y en dos meses la herramienta ganó reconocimientos por su facilidad de uso.

SOLIDWORKS ofrece un conjunto de herramientas completo para crear, simular, publicar, administrar datos y gestionar proyectos y procesos maximizando la innovación y la productividad de los recursos de ingeniería. Todas estas soluciones funcionan juntas para permitir a las organizaciones diseñar productos mejores, de forma más rápida y de manera más rentable.

SOLIDWORKS ofrece soluciones intuitivas para cada fase de diseño. Cuenta con un completo conjunto de herramientas que le ayudan a ser más eficaz y productivo en el desarrollo de sus productos en todos los pasos del proceso de diseño. La sencillez que es parte de su propuesta de valor es decisiva para lograr el éxito de muchos clientes.

La solución de SOLIDWORKS incluye cinco líneas de productos diferentes:

1. Herramientas de diseño para crear modelos y ensamblajes

2. Herramientas de diseño para la fabricación mecánica, que automatiza documentos de inspección y genera documentación sin planos 2D.

3. Herramientas de simulación para evaluar el diseño y garantizar que es el mejor posible

4. Herramientas que evalúan el impacto medioambiental del diseño durante su ciclo de vida.

5. Herramientas que reutilizan los datos de CAD en 3D para simplificar el modo en que las empresas crean, conservan y utilizan contenidos para la comunicación técnica.

Todas estas soluciones funcionan de forma conjunta para permitir que las empresas mejoren la fabricación de sus productos y los elaboren de forma más rápida y económica.

1.8.3 CATIA ^[35].

CATIA': Diseño Asistido por computadora en tres dimensiones para aplicaciones interactivas (en inglés computer-aided three dimensional interactive application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora comercial realizado por Dassault Systèmes

El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos.

CATIA facilita la ingeniería colaborativa a través de disciplinas, incluyendo:

La superficie y forma de diseño.

Ingeniería Mecánica.

Diseño de Equipos.

Ingeniería de Sistemas.

Es un software que agrupa multitud de aplicaciones, con muy variadas funcionalidades, y ello permite, que bajo una única interfaz, se puedan controlar todas las fases a lo largo de la vida de un producto.

Engloba todas las herramientas necesarias desde la concepción del diseño, hasta el análisis, la simulación y presentación, la fabricación o producción y, mantenimiento de este. Es un software escalable, ya que consta de unos módulos básicos y se va ampliando

en función de necesidades, y hacia unos módulos que pueden ser altamente específicos, para algún tipo de industrias.

CATIA forma parte del grupo de software de más alta gama, por prestaciones, usabilidad, potencia y otras características, junto con Pro-Engineer o Unigraphics.

Estas herramientas son una solución al diseño ya que nos permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma fiable y con precisión

Para diseñar un conjunto o ensamblaje se diseñan cada una de las piezas y se hacen relaciones de posición para definir el ensamblaje tridimensional. Finalmente se pueden obtener los planos de las piezas o del ensamblaje de forma automática [36].

1.8.4 Ventajas y desventajas entre Solidworks y CATIA

CATIA se adapta especialmente bien cuando existen cambios en el proyecto y si necesitamos reutilizar componentes y conjuntos de proyectos más antiguos.

SolidWorks en cambio nos aporta una enorme sencillez a la hora de diseñar y ensamblar piezas. También es bueno respecto al cambio, aunque en proyectos de gran envergadura no es la mejor opción.

SolidWorks dispone de un catálogo por defecto mucho más completo y mucho más fácil de utilizar. SolidWorks sabe qué tornillo debes poner en la perforación que le indicas y lo coloca sin problemas. En Catia V5 no solo tenemos dificultades a la hora de crear una perforación y que éste no pierda los vínculos con su plano, sino que, nos deja insertar en el agujero cualquier tipo de tornillo. SolidWorks, además, tiene un módulo de cinemática mucho más intuitivo.

Todas aquellas empresas con proyectos únicos donde la capacidad de reutilización de piezas sea mínima, tienen a su elección una herramienta poderosa que se llama SolidWorks, en cambio, aquellas empresas con grandes proyectos donde el catálogo de estos sea tan importante para la empresa, debería utilizar Catia V5. Hay otros aspectos, Catia V5 es mucho más completo en módulos, por ejemplo, éste programa tiene un módulo de Composites en comparación el módulo de generación de superficies de SolidWorks. Ese aporte representa poder diseñar piezas más complejas y poderlas

construir con fibras. SolidWorks es el más adecuado en el diseño de maquinaria, de productos.

Catia V5 sin en cambio trabajar en sectores ferroviarios, aeronáutico, automoción.

Ahora con la ayuda de CAD's como Solidworks® y CATIA, se diseño el prototipo de un sistema fotocatalítico para la eliminación de colorantes en aguas contaminadas, por lo que se podrá tener un modelado de cada una de la piezas, ensamblajes y superficies. Estos programas son una herramienta que facilita enormemente la modificación rápida de operaciones tridimensionales y de operación sin tener que hacer rediseños. Estas herramientas son una solución al diseño ya que nos permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma fiable y con precisión

Para diseñar un conjunto o ensamblaje se diseñan cada una de las piezas y se hacen relaciones de posición para definir el ensamblaje tridimensional. Finalmente se pueden obtener los planos de las piezas o del ensamblaje de forma

CAPITULO 2

METODOLOGÍA

La metodología se divide en tres secciones, la primera consiste en la síntesis y caracterización del composito TiO_2/ZnO . La segunda sección de la metodología consiste en el diseño del reactor que soportará al composito semiconductor y finalmente la tercera sección describe la metodología para el monitoreo de la temperatura utilizando sensores y su registro en Python.

2.1 Análisis por Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es uno de los métodos más importantes para identificar las estructuras de compuestos cristalinos. El método analítico de DRX de polvo cristalino proporciona información cualitativa acerca de los compuestos presentes en una muestra sólida.

En este equipo se utiliza un haz de electrones donde la unidad de medida en la región de los RX es el Angstrom (Å), igual a 10^{-10} m, los rayos X utilizados en difracción tienen longitudes de onda en el intervalo 0.5-2.5 (Å), el cual es acelerado a una energía de 30 Kv y es lanzado contra la muestra en un ángulo de 2θ , en este ángulo se encontrará el detector para captar los fenómenos de difracción donde los electrones dispersados emergentes de la muestra generaran un pico característico, el cual se variará dependiendo de la estructura atómica y del sistema cristalino al que corresponda la muestra.

Los catalizadores y soportes se analizaron por difracción de rayos X utilizando el equipo de Difracción de Rayos X (DRX) D8-Discover marca Bruker con detector Lynx Eye (ojo de lince), las muestras se analizaron desde 5° hasta 70° (valores 2θ), obteniendo los patrones de difracción para los catalizadores. La muestra se muele hasta obtener un polvo fino homogéneo para obtener numerosos cristalitos posteriormente se forma una pastilla la cual se coloca en el porta muestras del equipo para su análisis, tal como se puede observar en las siguientes figuras.



Figura 2.1 Equipo de Difracción de Rayos X

Fuente: Propia equipo Cuvitt BUAP

2.2 Síntesis y caracterización del compuesto TiO_2/ZnO .

Siguiendo la metodología propuesta por Jintao Tian et al. (Tian, Chen, & al., 2009) tenemos el siguiente procedimiento.

Materiales

- Reactivos empleados
 - Para la preparación del Oxido de Titanio (TiO_2):
 - Bióxido de titanio
 - Etanol
 - Ácido acético
 - Agua desionizada
 - Para la preparación del óxido de Zinc (ZnO).
 - Acetato de Zinc dihidratado
 - Etanol
 - Dietanolamina
 - Agua desionizada

- Equipo
 - Balanza analítica
 - Vasos de precipitado.
 - Agitador magnético
 - Bureta
 - Pipetas graduadas
 - Perilla
 - Parrilla de agitación y calentamiento
 - Soporte universal
 - Espátula
 - Pinza de laboratorio
 - Mufla
 - Aerógrafo

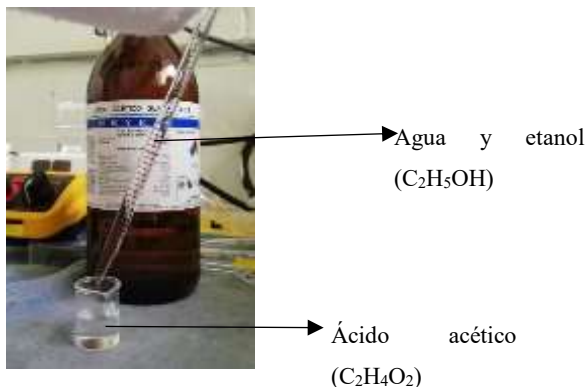
2.2.1 Procedimiento para la síntesis del compuesto TiO_2

1. Mezclar en un vaso de precipitados 5 ml de Butóxido de titanio con 20 ml de alcohol etílico y agitar por 30 minutos.

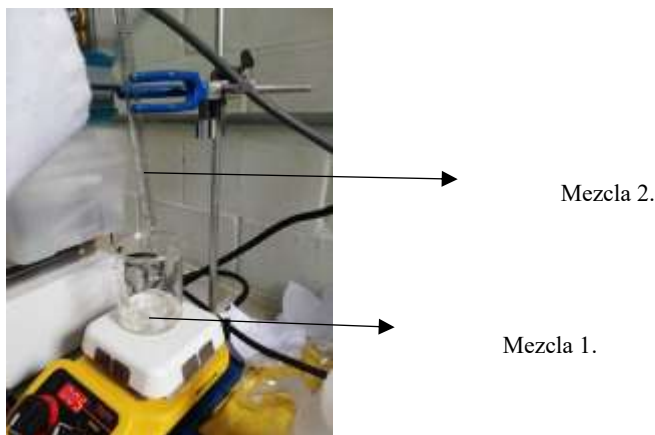


Butóxido de Titanio y etanol
($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

2. Mezclar en un vaso de precipitados de 20 mL, 0.26 ml de agua desionizada con 3.4 ml de ácido acético y 5 ml de etanol, la mezcla colocarla en una bureta.



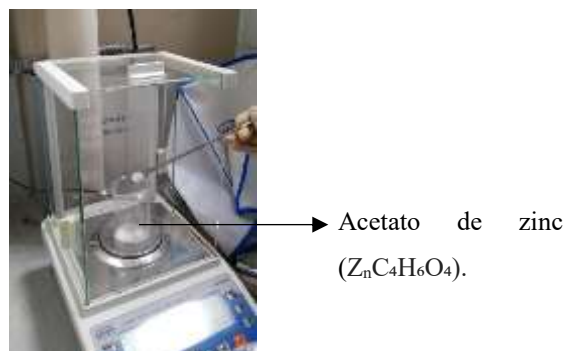
3. Agregar gota a gota a una velocidad de 1 gota/s la solución del paso 2 a la solución del paso 1, con agitación vigorosa.



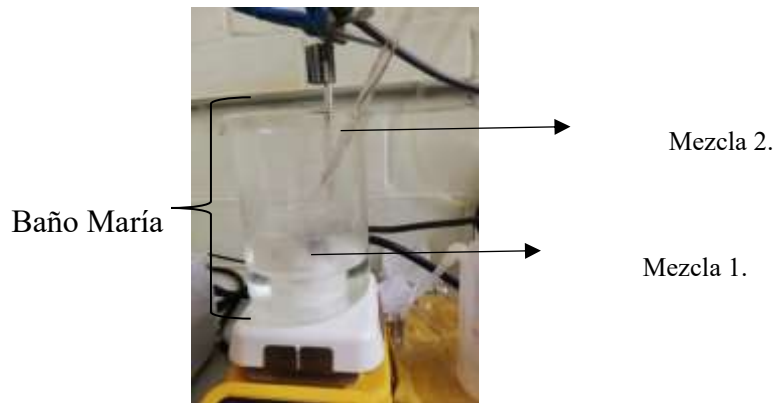
- 4.- Continuar agitando durante 1 hr.

2.2.2 Procedimiento para la síntesis del compuesto ZnO

- 1.- Se pesan 3.29 gamos de acetato de Zinc ($ZnC_4H_6O_4$) y se le agregan 50 ml. de etanol (C_2H_5OH), después agitar en baño maría a $70^\circ C$ por 5min.

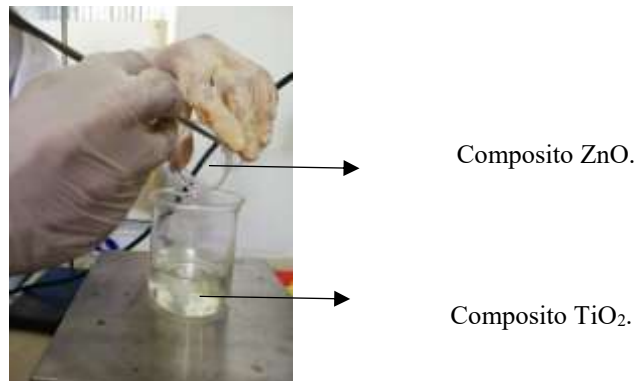


- 2.- Preparar 1.58 ml. De dietanolamina agregamos 0.26 ml. De agua desionizada y 5ml. De etanol (C_2H_5OH).
- 3.- La mezcla 2. Se agrega gota por segundo con agitación vigorosa a la mezcla 1.



2.2.3 Procedimiento para la síntesis del compuesto TiO_2/ZnO

- 1.- Se mezclan la solución del compuesto ZnO a la solución del compuesto TiO_2 .



- 2.- Se agita vigorosamente durante 2 hrs.



- 3.- Se dejará reposar por 8 hrs. para obtener solución gel.



4. Finalmente, para evaluar las propiedades estructurales del compuesto TiO_2/ZnO , se llevará a cabo el depósito de dicho material sobre sustratos de acero inoxidable (previamente lavados con etanol, acetona y agua desionizada) por medio de la técnica dip-coating, posteriormente se les dará un tratamiento térmico por 2h a 500°C bajo una atmósfera de aire.

Una vez obtenidos los sustratos con el compuesto depositado, se procederá a realizar la caracterización del material mediante las técnicas de XRD.



Fig. 2.2 a) Catalizador TiO_2



b) Catalizador ZnO

2.3 Metodología para el diseño del fotorreactor.

En esta sección se procederá a diseñar el fotorreactor, el cual consistirá en un prototipo con tubos concéntricos colocados en un doble colector parabólico.

Se empleará los software de modelado en 3D Solidworks® (www.solidworks.com) y CATIA para diseñar el fotorreactor y obtener un archivo en formato CAD, que servirá de base para su posterior construcción.

El siguiente es un diseño preliminar del fotorreactor así como de las partes que lo forman:

- 3 tubos de acrílico de 2 pulgadas de diámetro.
- Empaque formado de malla de acero inoxidable con el material fotoactivo el cual se fijará dentro de tubos de acrílico de 40 cm de longitud y 1 pulgadas de diámetro. Lo anterior para maximizar el área de contacto.

Los tubos concéntricos serán colocados en el doble colector parabólico de aluminio para maximizar el proceso fotocatalítico (ver Fig. 2.3).

2.4 Metodología para el monitoreo de la temperatura dentro del fotorreactor

Se utilizarán 2 sensores de temperatura para monitorear las temperaturas a la entrada y salida del fotorreactor, estos sensores utilizarán la plataforma Arduino para su programación y para la adquisición de datos la plataforma Python.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Caracterización de TiO₂ por Difracción de rayos X

El fotocatalizador de TiO₂ fue caracterizado por su espectro de difracción de rayos X (DRX). Estos difractogramas permitieron la comparación entre las bandas presentes con las reportadas para tener la seguridad que se encuentra la fase Anatasa.

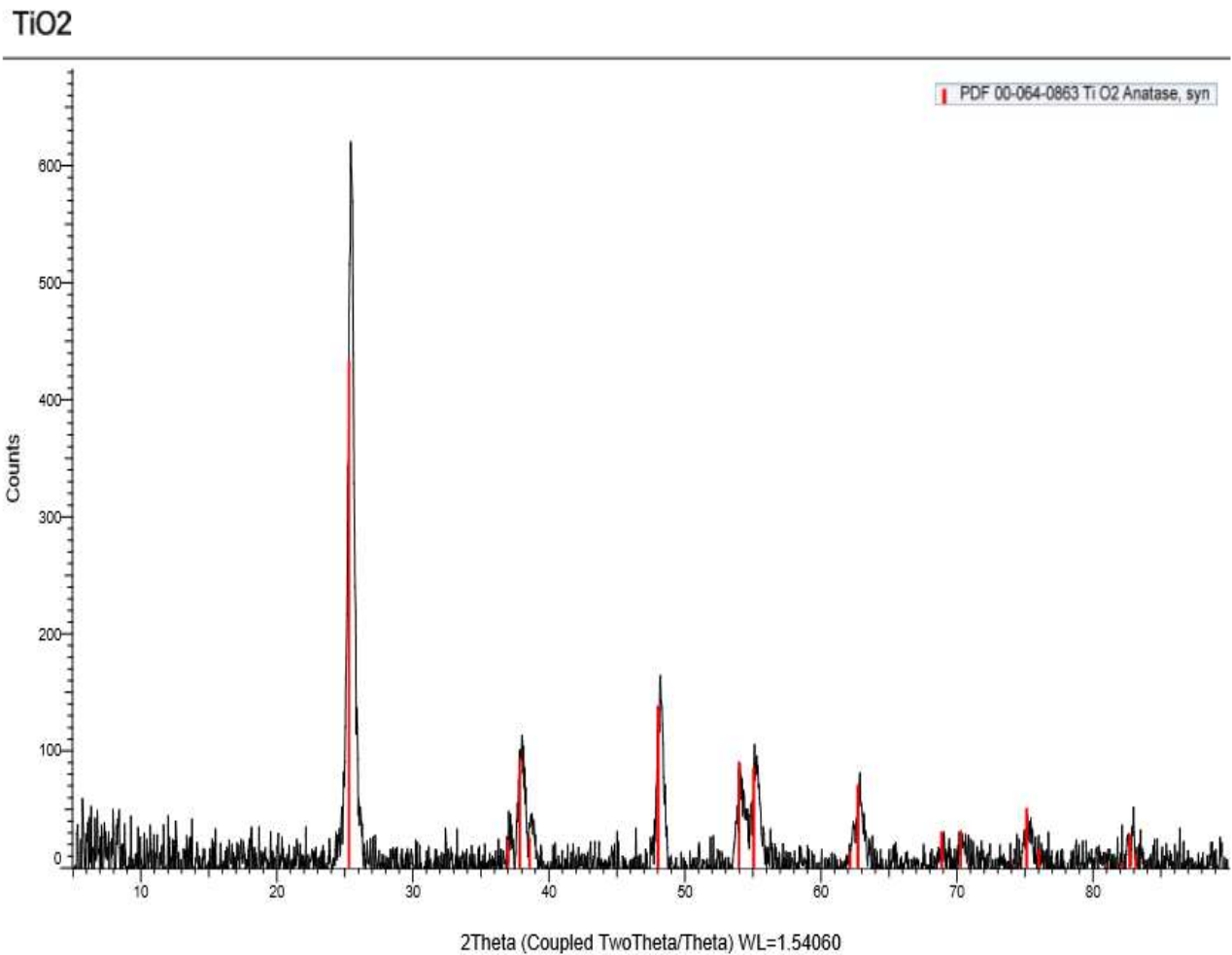


Figura 3.1 Espectro de difracción de rayos X (DRX) de TiO₂

Pattern: PDF 00-064-0863 Radiation: 1.54060 Quality: Star (*)

Formula		Ti O2		d	2 θ	I fix	h	k	l
Name		Titanium oxide		3.51616	25.309	1000	1	0	1
Name (mineral)		Anatase, syn		2.42788	36.996	55	1	0	3
Name (common)		anatase, nano		2.37339	37.877	217	0	0	4
				2.33152	38.584	60	1	1	2
				1.89268	48.032	320	2	0	0
				1.69718	53.984	210	1	0	5
Lattice:		Tetragonal		1.66658	55.059	197	2	1	1
S.G.:		I41/amd (141)		1.49270	62.135	33	2	1	3
		Mol. weight = 79.86		1.47977	62.739	164	2	0	4
		Volume [CD] = 136.03		1.36208	68.878	72	1	1	6
		Dx = 3.899		1.33833	70.279	74	2	2	0
		Dm =		1.27675	74.217	7	1	0	7
		I/ICor = 5.010		1.26357	75.124	118	2	1	5
a =	3.78536	Z = 4		1.25079	76.027	37	3	0	1
c =	9.49360			1.18670	80.949	7	0	0	8
a/b =	1.00000			1.17205	82.177	10	3	0	3
c/b =	2.50798			1.16576	82.717	64	2	2	4
				1.16070	83.158	27	3	1	2
Physical property: Nano-powder				1.05844	93.399	8	2	1	7
Sample Preparation: Prepared by mixing hexanoic acid, titanium(IV) butoxide, 1-butanol and deionized water in a glass insert of a stainless steel pressure reactor and stirring for 30 minutes at room temperature. The temperature was increased to 508 K in 1 hour and the mixture was stirred for an additional 5 hours. After cooling, the precipitate was isolated by centrifugation and washed with hexane before the final solid was dried in ambient air overnight				1.05090	94.275	34	3	0	5
Raw Data Comment: Broad peaks resulting from nano-sized particles				1.04351	95.153	35	3	2	1
Calculated Pattern Original Remarks: Original Max Intensity 999.0 < 1000.0				1.01613	98.589	27	1	0	9
				1.00541	100.020	17	2	0	8
				0.99646	101.254	12	3	2	3
				0.95463	107.590	49	3	1	6
				0.94634	108.973	30	4	0	0
				0.92380	112.990	4	3	0	7
				0.91877	113.944	53	3	2	5
				0.91382	114.905	35	4	1	1
				0.89526	118.727	46	2	1	9
				0.89474	118.840	54	1	1	10
				0.88791	120.348	14	2	2	8
				0.88173	121.765	13	4	1	3
				0.87904	122.397	47	4	0	4
				0.87686	122.918	8	3	3	2
				0.84643	131.026	57	4	2	0
Radiation:	CuK α 1	Filter:	Not specified	0.84146	132.534	11	1	0	11
Wavelength:	1.54060	d-spacing:		0.83019	136.207	7	3	2	7
SS/FOM:	999.9 (0.0002,34)			0.82653	137.487	67	4	1	5

Tabla 3.2 Indice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina

Estas bandas de encuentran en $2\theta=25^\circ, 48^\circ, 53^\circ, 55^\circ$ y 62° son delgadas y de alta intensidad, lo que indica la presencia de una partícula cristalina.

Para las pruebas fotocatalíticas se requiere que el catalizador de TiO_2 se encuentre en la fase anatasa para comprobar que efectivamente se obtuvo la fase deseada, se utilizó la base de datos American Mineralogist Structure para comparar los resultados obtenidos por los difractogramas con los reportados en la base de datos.

American Mineralogist Crystal Structure Database

7 matching records for this search.

Anatase

Howard C J, Sabine T M, Dickson F

Acta Crystallographica B47 (1991) 462-468

Structural and thermal parameters for rutile and anatase

Locality: synthetic

_database_code_amcsd 0019093

3.7845 3.7845 9.5143 90 90 90 I4_1/amd

atom	x	y	z	U(1,1)	U(2,2)	U(3,3)	U(1,2)	U(1,3)	U(2,3)
Ti	0	0	0	.0052	0	0	.0052	0	.0070
O	0	0	.20806	.0117	0	0	.0027	0	.0072

[Download AMC data \(View Text File\)](#)

[Download CIF data \(View Text File\)](#)

[Download diffraction data \(View Text File\)](#)

[View JMOL 3-D Structure \(permalink\)](#)

Tabla 3.3 Base de datos de Anatasa

Fuente: <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/minerals/Anatase>

Se descarga el archivo CIF y se abre en el software libre Mercury.

(<https://mercury1.software.informer.com/3.8>)

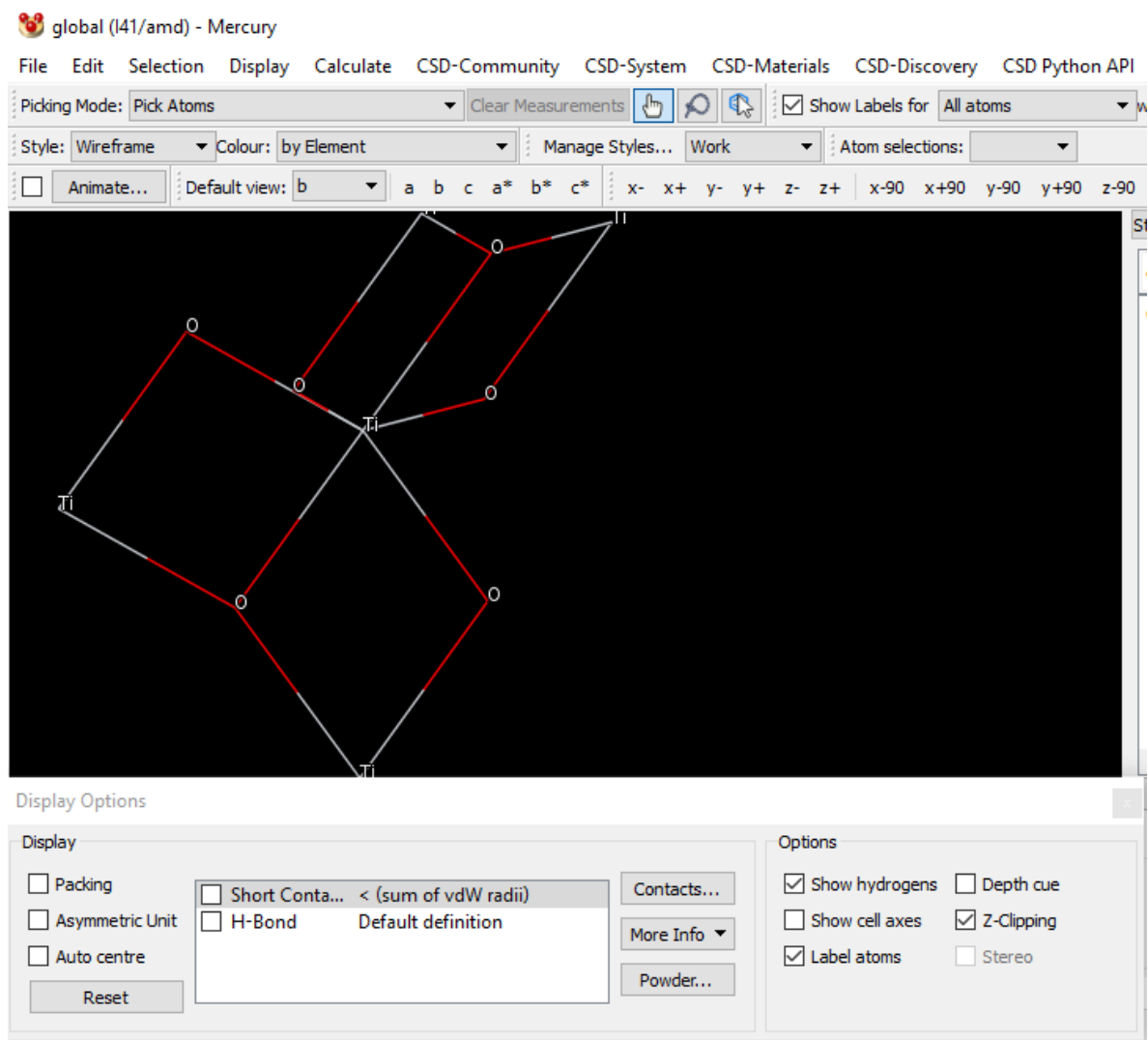


Figura 3.4 Interfase del software Mercury

Para observar el difractograma se abre el archivo CIF con la opción Powder.

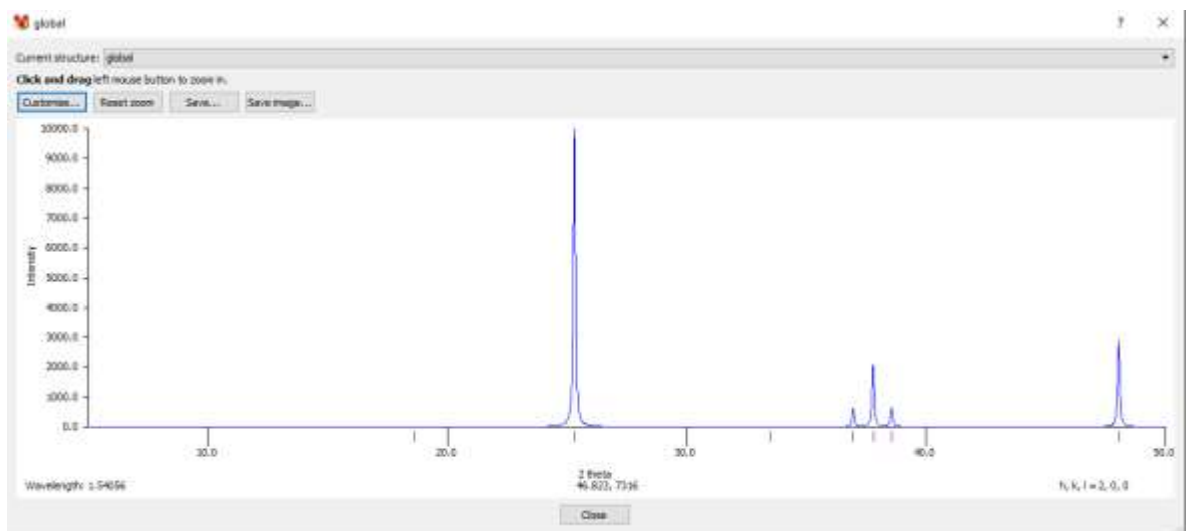
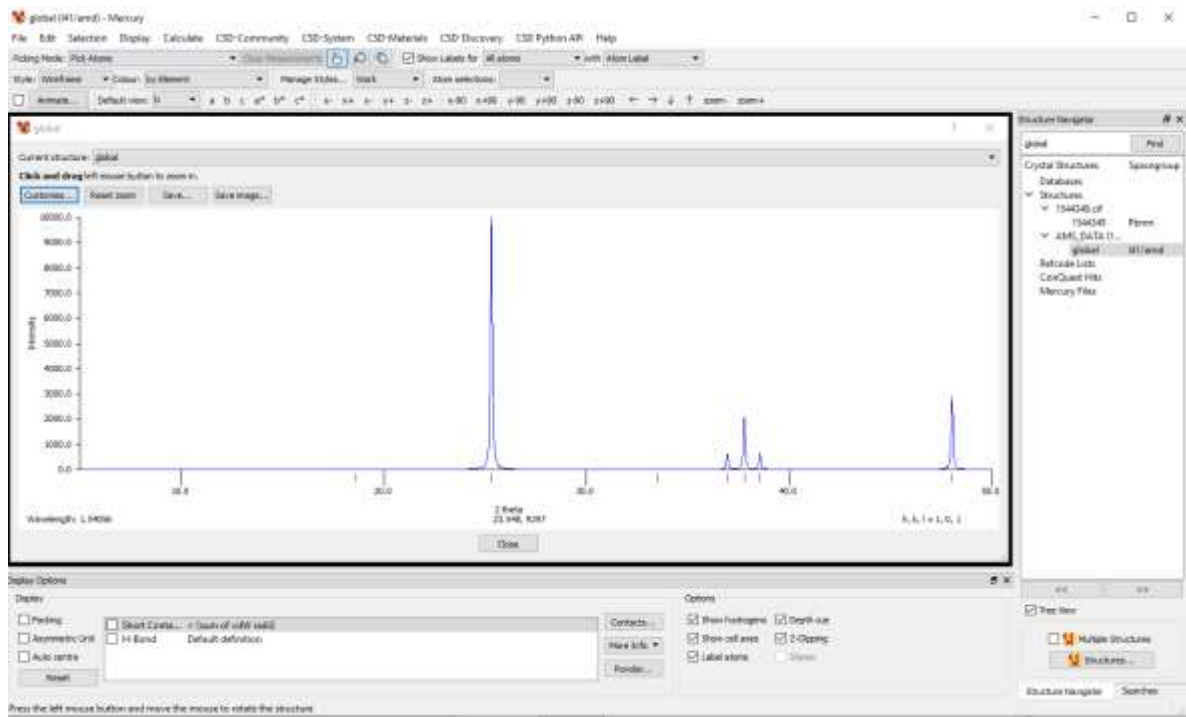


Figura 3.5 Difractograma de TiO_2 fase anatasa de la base de datos American Mineralogist Structure

Anatase
 Parker R
 Zeitschrift fur Kristallographie 59 (1924) 1-54
 Zur Kristallstruktur von Anastas und Rutil. (II. Teil. Die
 Anastasstruktur).
 _cod_database_code 1010942
 _database_code_amcsd 0017663

CELL PARAMETERS: 3.7300 3.7300 9.3700 90.000 90.000 90.000
 SPACE GROUP: I4₁/amd
 X-RAY WAVELENGTH: 1.541838
 Cell Volume: 130.364
 Density (g/cm³): 4.069
 MAX. ABS. INTENSITY / VOLUME**2: 65.42149407
 RIR: 5.236

RIR based on corundum from Acta Crystallographica A38 (1982) 733-739

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
25.71	100.00	3.4655	1	0	1	8
37.56	4.36	2.3947	1	0	3	8
38.43	15.15	2.3425	0	0	4	2
39.20	7.85	2.2983	1	1	2	8
48.83	25.00	1.8650	2	0	0	4
54.82	16.04	1.6745	1	0	5	8
55.99	16.14	1.6423	2	1	1	16
63.19	2.08	1.4714	2	1	3	16
63.79	9.81	1.4591	2	0	4	8
70.02	6.87	1.3438	1	1	6	8
71.55	5.56	1.3188	2	2	0	4
76.45	8.63	1.2460	2	1	5	16
77.43	2.38	1.2325	3	0	1	8
84.27	3.59	1.1492	2	2	4	8
84.75	1.78	1.1438	3	1	2	16

=====

XPOW Copyright 1993 Bob Downs, Ranjini Swaminathan and Kurt Bartelmehs
 For reference, see Downs et al. (1993) American Mineralogist 78, 1104-1107.

Tabla. 3.6 Índice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina reportados en la base de datos American Mineralogist Structure

Comparando las figuras 3.1 con 3.5 y las tablas de datos 3.2 con 3.6 se puede observar que coinciden por lo tanto se tiene la seguridad que el método de preparación empelado fue adecuado para la síntesis del TiO₂.

3.2 Caracterización de ZnO por Difracción de rayos X.

El catalizador ZnO fue caracterizado por su espectro de difracción de rayos X (DRX). Estos difractogramas permitieron la comparación entre las bandas presentes con las reportadas para tener la seguridad que el método empleado para la obtención del composito fue el adecuado.

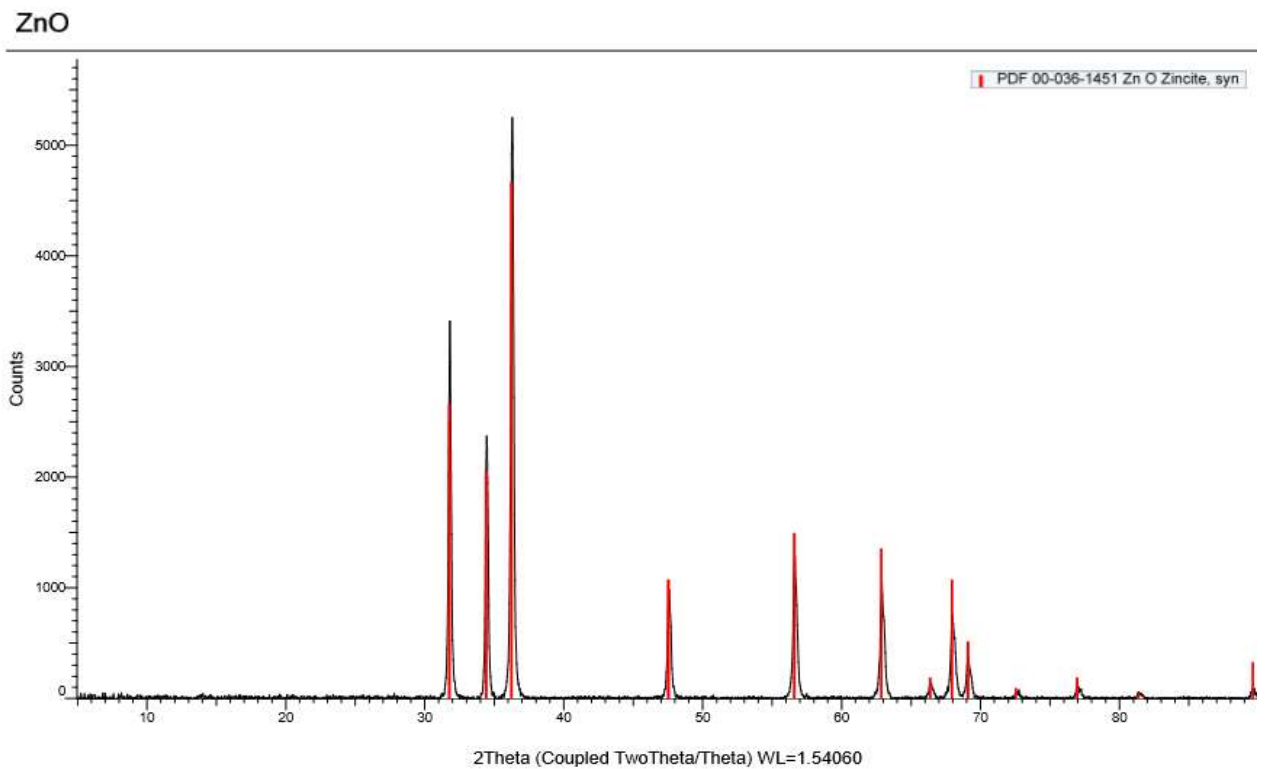


Figura 3.7 Espectro de difracción de rayos X (DRX) de ZnO


Pattern: PDF 00-036-1451 Radiation: 1.54060 Quality: Star (*)


Formula		Zn O		d	2θ	I fix	h	k	l
Name		Zinc Oxide		2.81430	31.770	58	1	0	0
Name (mineral)		Zincite, syn		2.60332	34.422	45	0	0	2
Name (common)		chinese white, zinc white		2.47592	36.253	101	1	0	1
				1.91114	47.539	24	1	0	2
				1.62472	56.603	33	1	1	0
				1.47712	62.864	30	1	0	3
Lattice:		Hexagonal		1.40715	66.380	5	2	0	0
S.G.:		P63mc (186)		1.37818	67.963	24	1	1	2
				1.35825	69.100	12	2	0	1
				1.30174	72.562	3	0	0	4
				1.23801	76.955	5	2	0	2
				1.18162	81.370	2	1	0	4
				1.09312	89.607	8	2	0	3
				1.06384	92.784	3	2	1	0
				1.04226	95.304	6	2	1	1
				1.01595	98.612	5	1	1	4
				0.98464	102.946	3	2	1	2
				0.97663	104.134	6	1	0	5
				0.95561	107.430	2	2	0	4
				0.93812	110.392	3	3	0	0
				0.90694	116.279	9	2	1	3
				0.88256	121.572	5	3	0	2
				0.86768	125.188	2	0	0	6
				0.83703	133.932	3	2	0	5
				0.82928	136.520	2	1	0	6
				0.82370	138.513	3	2	1	4
				0.81247	142.918	3	2	2	0
Mol. weight =		81.38							
Volume [CD] =		47.62							
Dx =									
Dm =									
I/lor =		-1.000							
a =	3.24982	Z =	2						
c =	5.20661								
a/b =	1.00000								
c/b =	1.60212								
Additional Patterns: To replace 00-005-0664 (5). See PDF 01-075-1526									
General Comments: The structure was determined by Bragg (1) and refined by Abrahams, Bernstein (2). A high pressure cubic NaCl-type of ZnO is reported by Bates et al. (3) and a cubic, sphalerite type is reported by Radczewski, Schicht (4)									
Powder Data: References to other early patterns may be found in reference (5)									
Sample Source or Locality: The sample was obtained from the New Jersey Zinc Co., Bethlehem, Pennsylvania, USA									
Temperature of Data Collection: The approximate temperature of data collection was 299 K									
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction									
Radiation: CuKα1		Filter: M							
Wavelength: 1.54060		d-spacing:							
SS/FOM: 130.7 (0.0071,29)									

Tabla 3.8 Índice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina de ZnO

8 matching records for this search.

Zincite

 Kihara K, Donnay G

 The Canadian Mineralogist 23 (1985) 647-654

Anharmonic thermal vibrations in ZnO

Model: 2-c, at T = 293 K

_database_code_amcsd 0005203

3.2494 3.2494 5.2038 90 90 120 P6_3mc

atom x y z U(1,1) U(2,2) U(3,3) U(1,2) U(1,3) U(2,3)

Zn 1/3 2/3 0 .0182 .0182 .0054 .0091 0 0

O 1/3 2/3 .3821 .0181 .0181 .0054 .00905 0 0

[Download AMC data \(View Text File\)](#)

[Download CIF data \(View Text File\)](#)

[Download diffraction data \(View Text File\)](#)

[View JMOL 3-D Structure \(permalink\)](#)

Tabla 3.9 Base de datos ZnO

Fuente: <http://rruff.geo.arizona.edu/AMS/minerals/Zincite>

Zincite

Kihara K, Donnay G

The Canadian Mineralogist 23 (1985) 647-654

Anharmonic thermal vibrations in ZnO

Model: 2-c, at T = 293 K

_database_code_amcsd 0005203

CELL PARAMETERS: 3.2494 3.2494 5.2038 90.000 90.000 120.000

SPACE GROUP: P6_3mc

X-RAY WAVELENGTH: 1.541838

Cell Volume: 47.584

Density (g/cm³): 5.681

MAX. ABS. INTENSITY / VOLUME**2: 108.5150060

RIR: 6.220

RIR based on corundum from Acta Crystallographica A38 (1982) 733-739

2-THETA	INTENSITY	D-SPACING	H	K	L	Multiplicity
31.80	52.55	2.8141	1	0	0	6
34.47	39.77	2.6019	0	0	2	1
36.29	100.00	2.4753	1	0	1	6
47.60	21.60	1.9104	1	0	2	6
56.65	31.17	1.6247	1	1	0	6
62.94	28.09	1.4766	1	0	3	6
66.45	4.24	1.4070	2	0	0	6
68.03	23.70	1.3781	1	1	2	6
69.16	12.05	1.3583	2	0	1	6
72.68	1.99	1.3010	0	0	4	1
77.05	3.74	1.2377	2	0	2	6
81.51	2.02	1.1809	1	0	4	6
89.74	7.92	1.0927	2	0	3	6

XPOW Copyright 1993 Bob Downs, Ranjini Swaminathan and Kurt Bartelmehs
For reference, see Downs et al. (1993) American Mineralogist 78, 1104-1107.

_Tabla. 3.10 Índice hkl para cada uno de los puntos de la red cristalina reportados en la base de datos American Mineralogist Structure

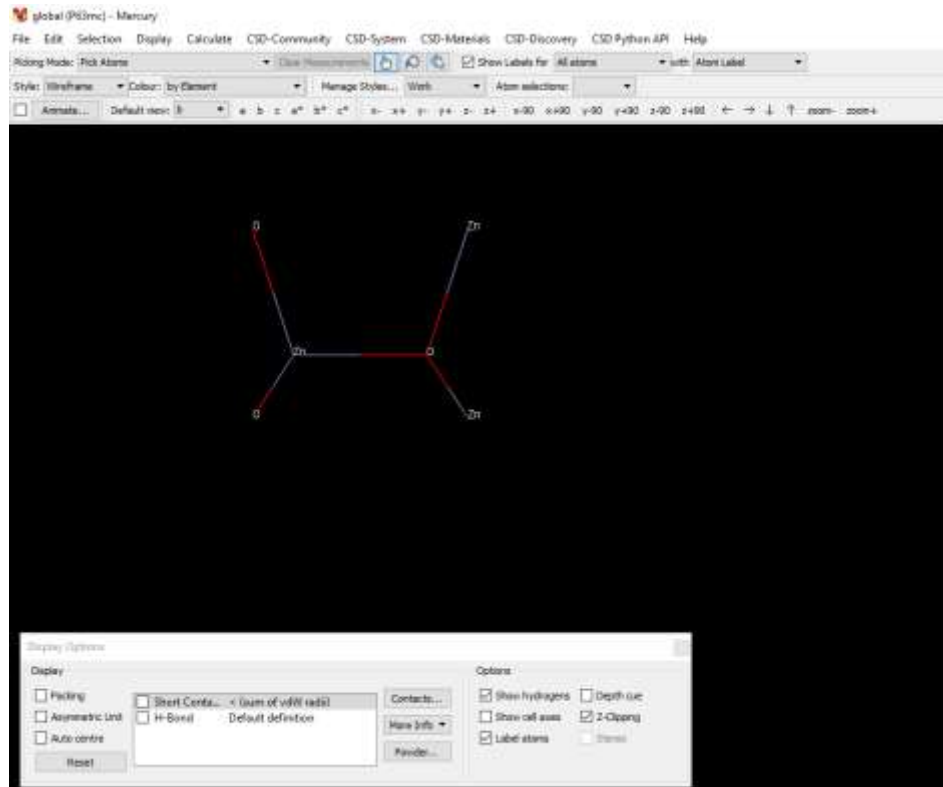


Figura 3.4 Interfase del software Mercury

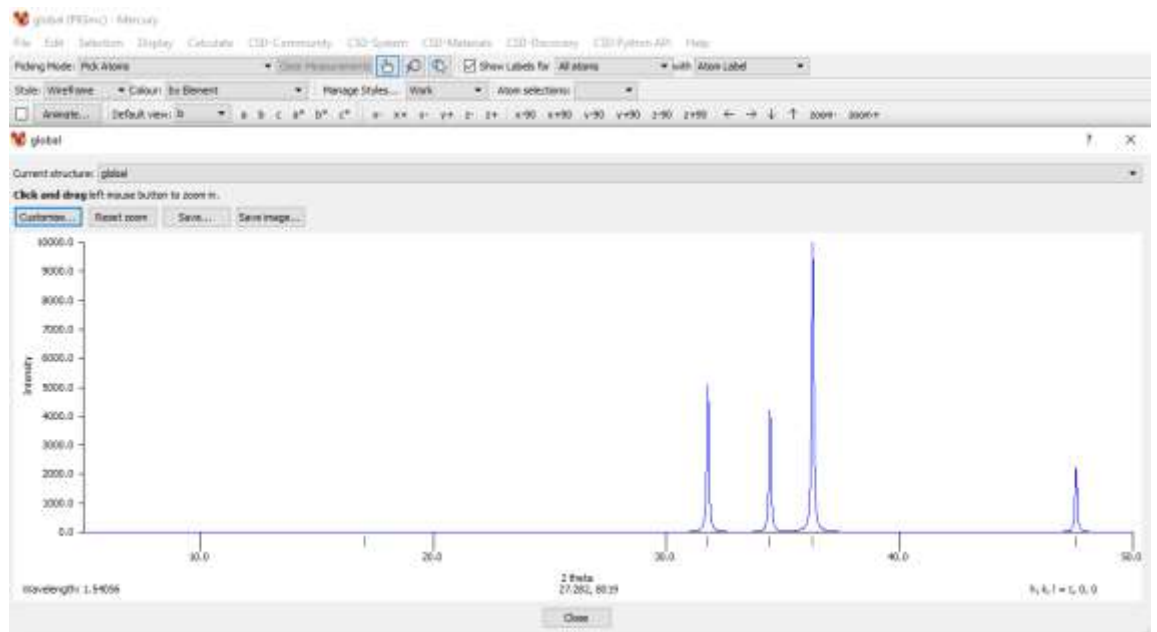
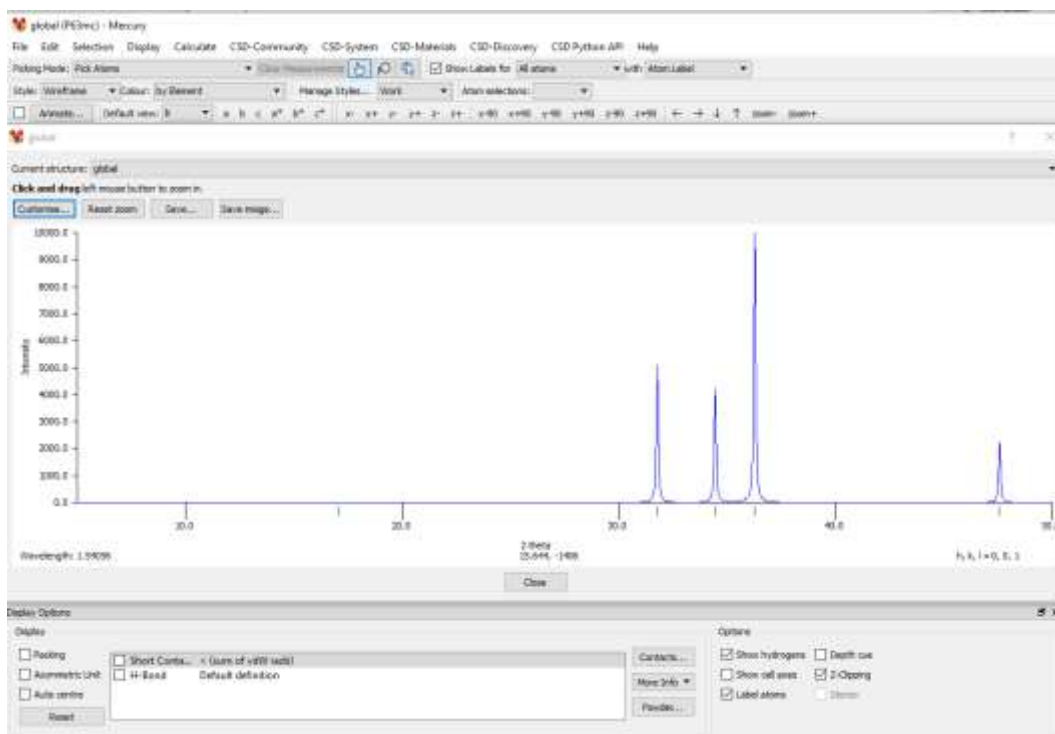


Figura 3.11 Difractograma de ZnO de la base de datos American Mineralogist Structure



Comparando las figuras 3.7 con 3.11 y las tablas de datos 3.8 con 3.10 se puede observar que coinciden por lo tanto se tiene la seguridad que el método de preparación empleado fue adecuado para la síntesis del ZnO

3.3 Diseño del fotorreactor

El diseño del fotorreactor se realizó en el software CATIA, la propuesta de construcción es utilizar tubos de vidrio de 2 pulgadas de diámetro de 40 cm de longitud, con conexiones de PVC (codos de 90°) y un colector de aluminio

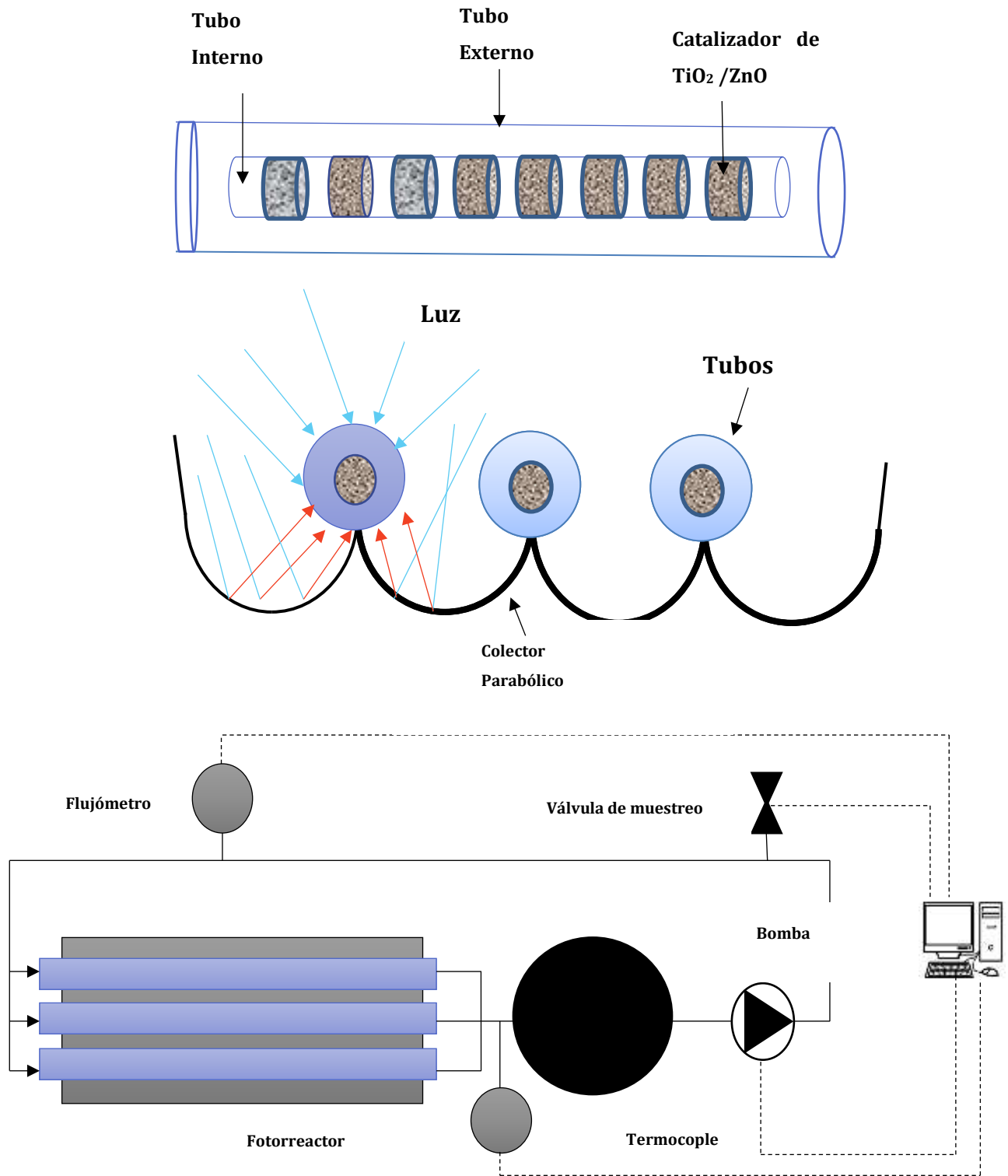


Figura 3.12. Esquema de fotorreactor. a) Diseño de tubos concéntricos, b) sección transversal del fotocolelector y c) Esquema del fotorreactor.

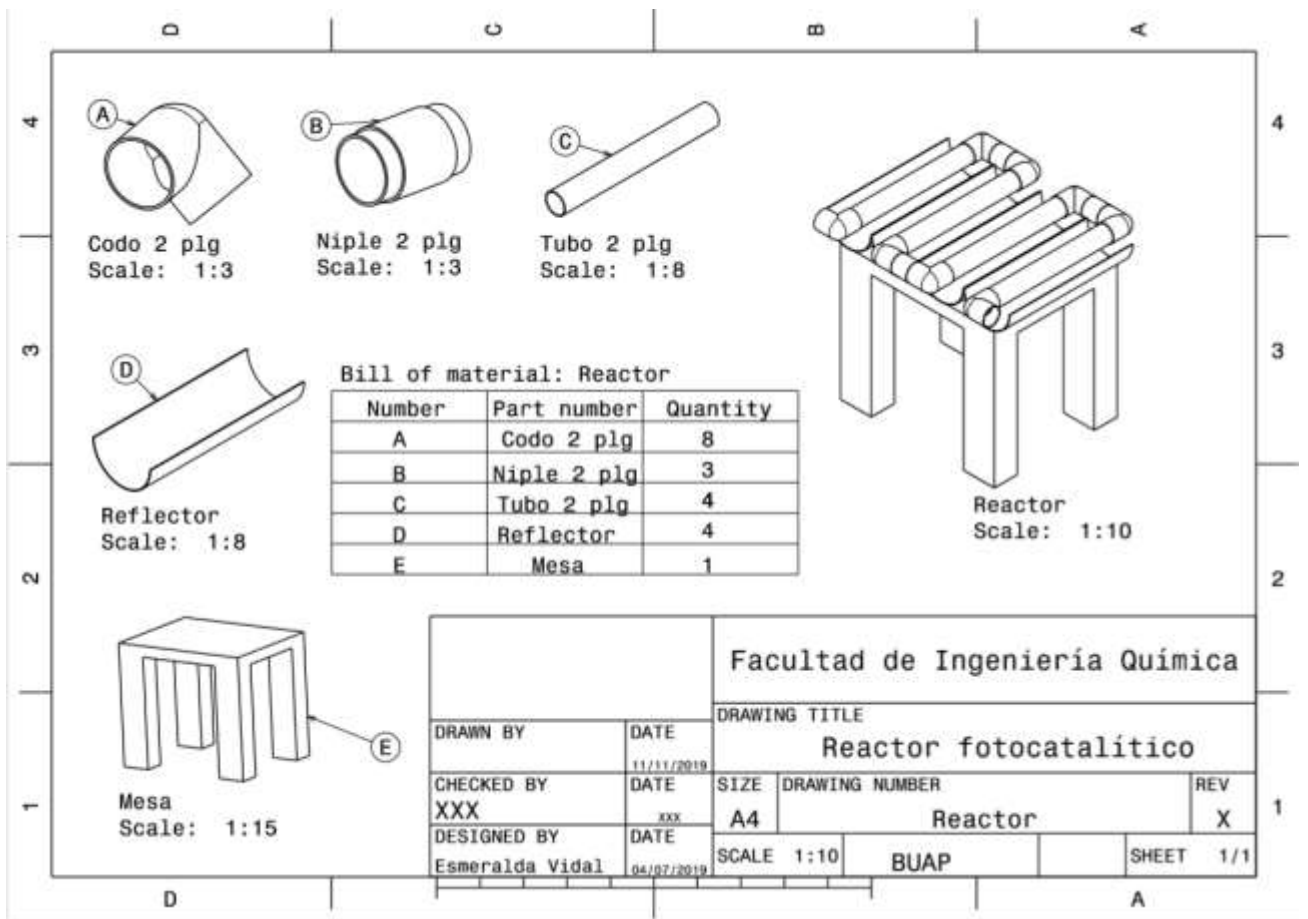


Figura 3.13 Diseño del reactor fotocatalítico utilizando el software CATIA

3.4 Sistema de monitoreo de la temperatura

Se muestra la instalación y generación del algoritmo de programación del sensor de temperatura en la plataforma Arduino.

La tarjeta Arduino empleada fue la tarjeta Arduino Uno que se muestra en la siguiente figura:



Figura 3.14 Placa Arduino Uno

El sensor seleccionado fue un sensor de temperatura Ds18b20 sumergible en agua que se puede ver en la figura 2:



Figura 3.15 Sensor de Temperatura

Para conectar el sensor de temperatura es necesaria una resistencia para modular el voltaje en la placa de Arduino y para una mejor distribución del cableado se utilizó una protoboard como la que se muestra a continuación:

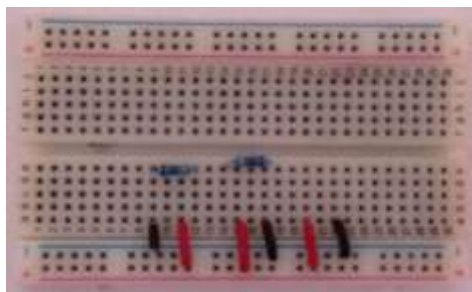


Figura 3.16 Placa protoboard y resistencias

Las librerías que se utilizaron para la lectura del sensor de temperatura se llaman Dallas Temperature y One Wire en formato zip y se deben incluir en la carpeta donde se guarde el archivo del sensor como se ve en la figura 4:

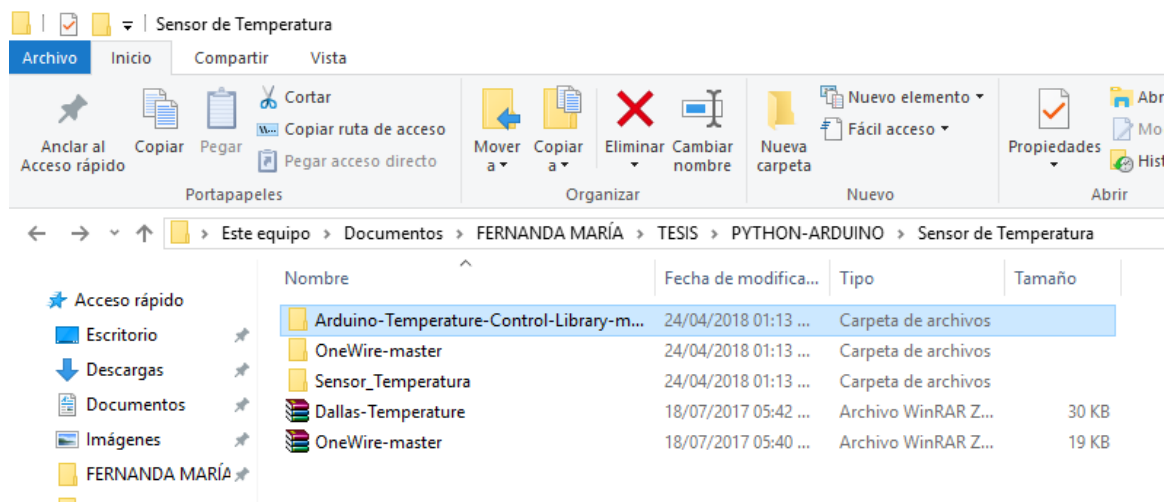


Figura 3.17 Archivo zip de la librería

La configuración de la conexión del sensor de temperatura con la tarjeta Arduino se muestra en la siguiente figura:

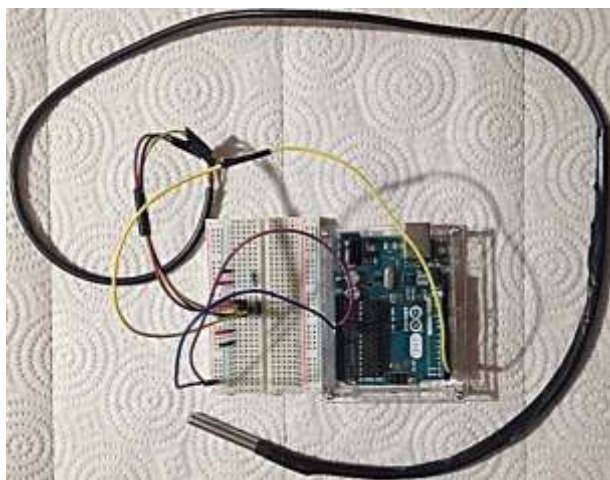


Figura 3.18 Configuración de conexión del sensor de temperatura

El algoritmo ejecutado en la plataforma Arduino para medir el valor de la variable de un sistema mediante el sensor de temperatura:

```

#include <DallasTemperature.h> //Se incluye la librería
#include <OneWire.h>          //Se incluye la librería

OneWire ourWire1(2);          //Se establece el pin 2 como bus OneWire
para sensor de Temperatura 1

DallasTemperature sensors1(&ourWire1); //Se declara una variable u objeto
para nuestro sensor1 de Temperatura 1

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  sensors1.begin(); //Se inicia el sensor de Temperatura 1
}

void loop() {

  sensors1.requestTemperatures(); //Se lee el sensor de Temperatura 1
  float temp1= sensors1.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en
°C del sensor de Temperatura 1
  Serial.print(temp1);
  //Serial.print(" C");
  Serial.print(" ");
}
}

```

El algoritmo ejecutado en el software Arduino y su lectura en pantalla se muestran en la figura 3.18:

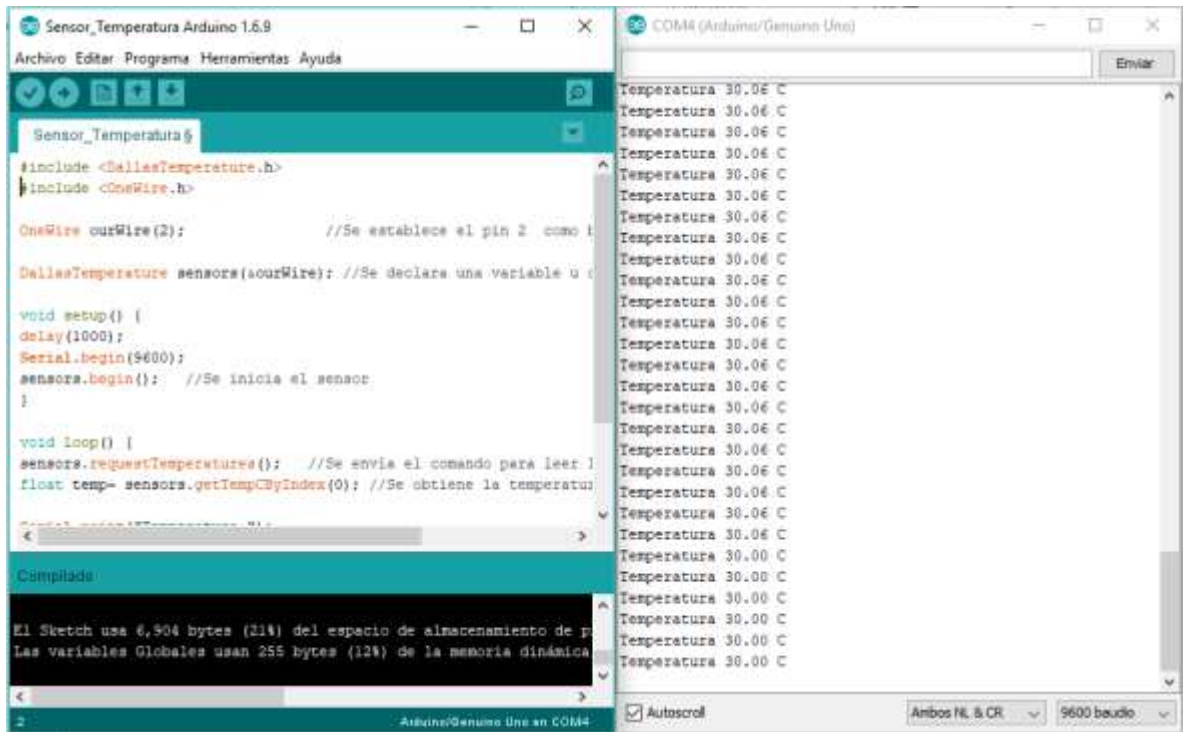


Figura 3.19 Algoritmo ejecutado del sensor de temperatura

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La síntesis de los catalizadores TiO_2 y ZnO preparados por la técnica sol-gel resulto adecuada, esto se comprobó por los resultados obtenidos de los espectros de difracción de rayos X, donde se compararon los resultados con respecto a los reportados y corresponden a las mismas señales características de estos fotocatalizadores.

Se realizó el diseño del fotorreactor empleando el software CATIA, lo que permite tener un diseño preciso para su posterior construcción y probar los catalizadores en la degradación de colorantes para trabajos futuros.

Finalmente se realizó la adquisición, programación y pruebas preliminares del sensor de temperatura utilizando la plataforma Arduino y Python para que una vez construido el fotorreactor se coloquen los sensores y se pueda monitorear la temperatura a la entrada y salida del mismo.

Esta tesis servirá de base para siguientes trabajos en los cuales se va a construir y probar el sistema acorde a los resultados presentados.

APENDICE 1

Instructivo para la construcción del reactor fotocatalítico usando Catia V5

CATIA (computer-aided three dimensional interactive application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora comercial realizado por Dassault Systèmes. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos.

Fue inicialmente desarrollado para servir en la industria aeronáutica. Se ha hecho un gran hincapié en el manejo de superficies complejas.

CATIA posibilita la creación de piezas en 3D, bocetos en 2D, chapa, materiales compuestos, moldeados, forjados o piezas de herramientas hasta la definición de su montaje mecánico. (CATIA, s.f.)

CATIA ofrece una solución para facilitar el proceso de trabajo y visualización para crear, modificar, y validar formas complejas e innovadoras para el diseño industrial (CATIA, s.f.)

La solución de los sistemas de ingeniería de CATIA reparte un único, abierto y extensible desarrollo de la plataforma de sistemas (de ingeniería) que integra completamente el área multidisciplinar de moldeado, simulación, verificación y la ayuda en el proceso de negocio requerido para desarrollar productos cyber-físicos complejos. (CATIA, s.f.)

Partes del fotorreactor

Para comenzar la elaboración del reactor fotocatalítico con ayuda de un software CAD como lo es CATIA v5. Tenemos que tomar en cuenta que todo será parte de un ensamblado, por consiguiente, tenemos que fragmentar nuestro diseño en partes, estas partes se enlistan a continuación:

Parte	Cantidad
Tubo de 2 pulgadas	4
Niple de 2 pulgadas	3
Codo de 2 pulgadas	8
Reflectores	4
Mesa	1

1. Tubo de 2 pulgadas

Para esta pieza consideramos las medidas del tubo real, con una longitud de 40 cm., un diámetro externo de 2 plg. y un grosor de 2 mm. (ya que se considera que dicho tubo será de vidrio).

Usando las herramientas del módulo de “Part design” en “Mechanical design” se comenzó por un trazo de dos circunferencias concéntricas, una de 5.08 cm. y otra de 4.68 cm. para después en el módulo de “Operaciones”, hacer una extrucción de 20 cm. con una reflexión en el eje principal para obtener como resultado una extrucción de 40 cm. obteniendo un resultado como en la imagen (Illus.1).

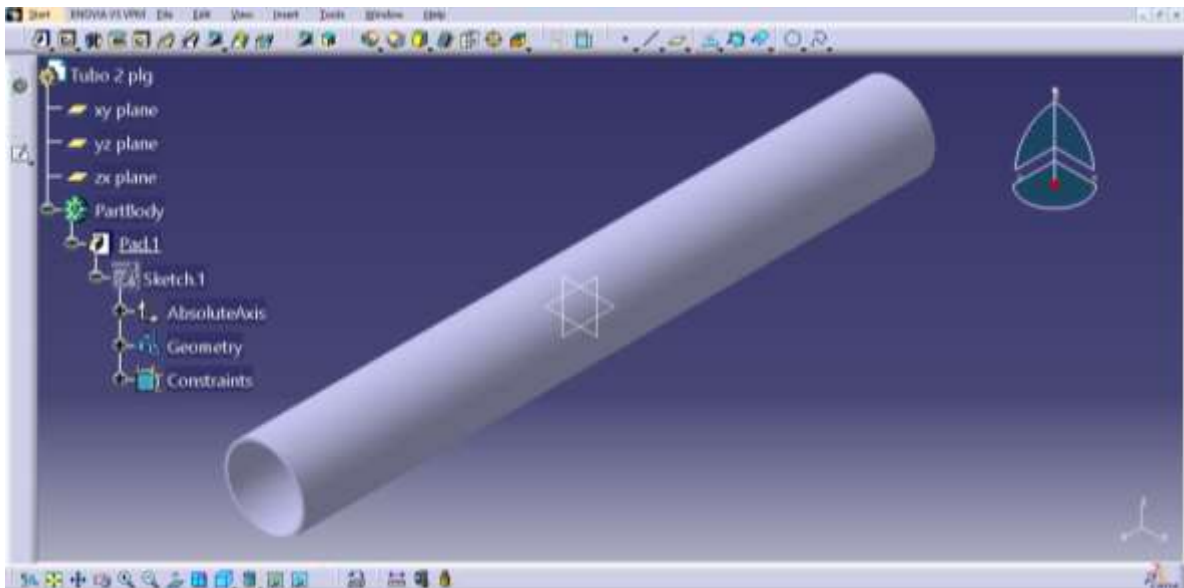


Ilustración 1. Tubo de 2 plg.

2. Niple de 2 pulgadas

En esta pieza tomaremos las medidas de un niple original, con un diámetro interno de 4.68 cm. con un grosor de 2 mm. y una base de diámetro de 5.48 cm.

Para su construcción básicamente se usaron dos sketches; el primero fue de la mitad del niple visto desde perfil, con las medidas anteriormente especificadas y con un largo de 8 cm. para ejecutar la operación de “Shaft” la cual nos dará la superficie cilíndrica del niple, y el segundo sketch fue un círculo tomando como base una de las tapas del niple, con la cual se ejecutó una operación llamada “Pocket” para hacer el vaciado del niple, todo esto nos da como resultado la siguiente imagen (Illus.2).

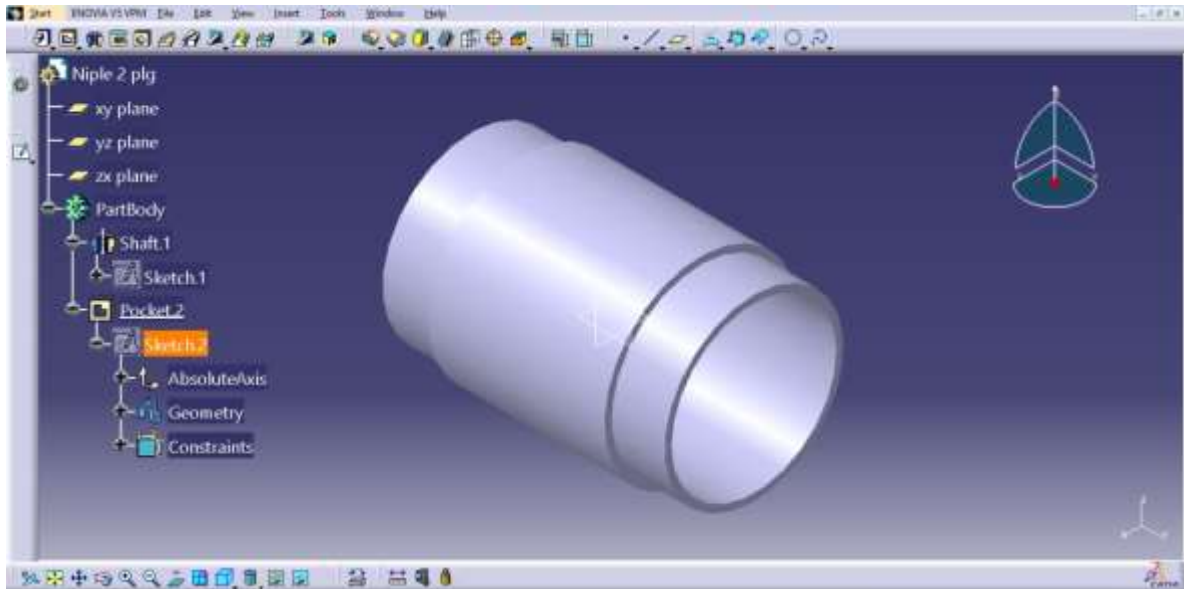


Ilustración 2. Niple de 2 plg.

3. Codo de 2 pulgadas

Siguiendo la metodología de las partes anteriores se usaron las medidas de un codo real de 2 plg.

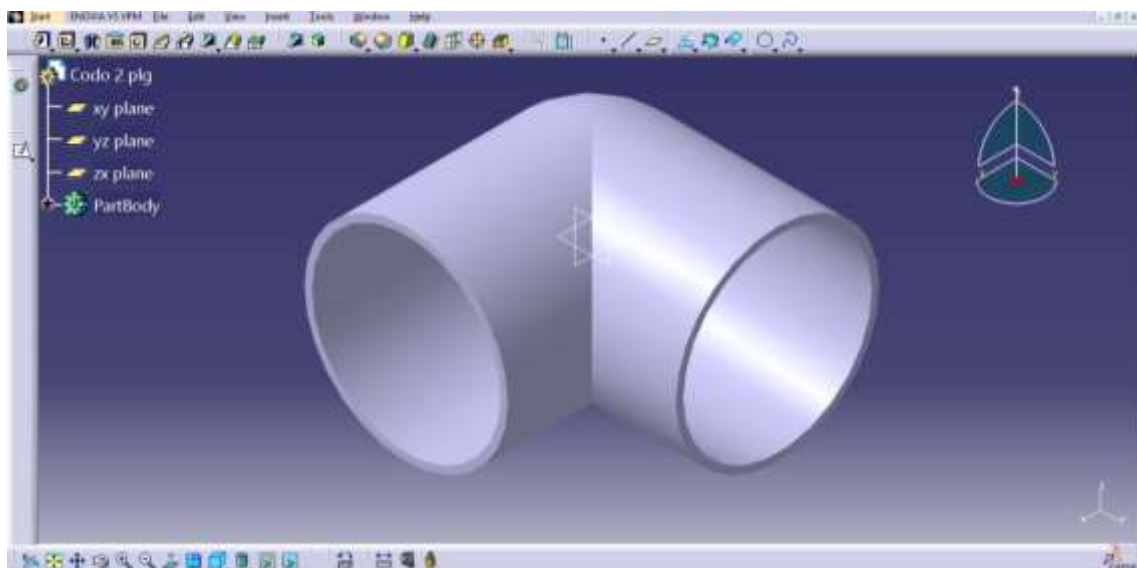


Ilustración 3. Codo de 2 plg.

Para su construcción se necesitaron de varios sketches todos con relación a la posición del codo y muchos “pockets” para el vaciado de las “extrucciones”, para obtener como resultado la siguiente imagen (Illus.3).

4. Reflectores

Para dicha pieza se tomará como referencias las medidas del tubo y la distancia entre la mitad del niple con respecto al siguiente niple, para darnos como resultado, unos reflectores de longitud 40 cm. y una media luna de diámetro 15 cm. y grosor de 2 mm.

Para su construcción se basó de un sketch de una media luna especificando el diámetro externo y una media luna interna con el grosor, para después en operaciones ejecutar una extrucción de 40 cm. Lo cual nos dio un resultado como la siguiente imagen (Illus.4).

5. Mesa

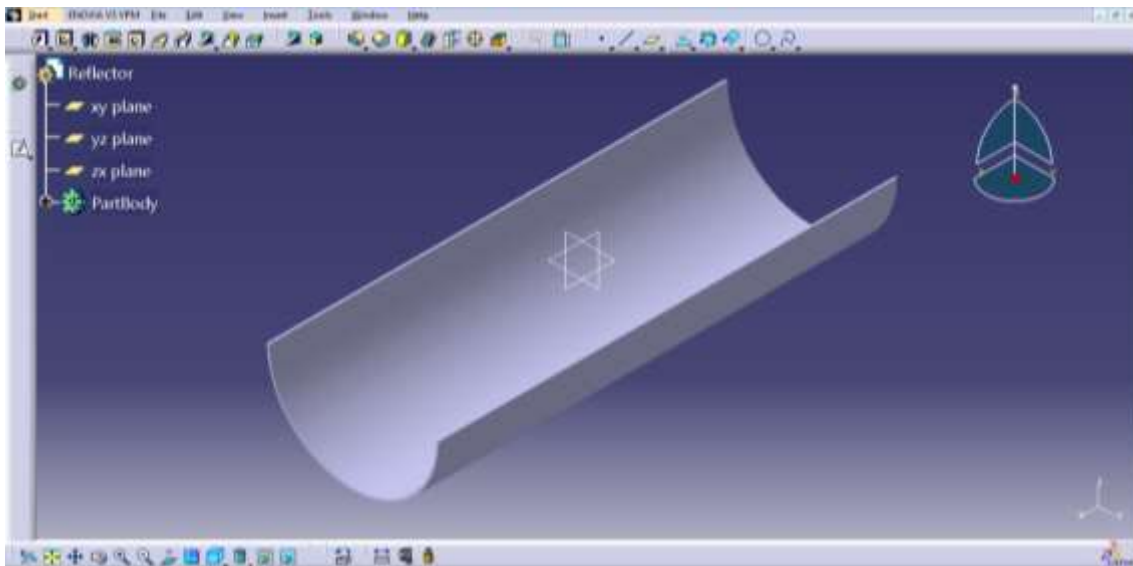


Ilustración 4. Reflector

Por último, y solo de manera demostrativa se elaboró una mesa, para hacer la simulación del posicionamiento del reactor ya instalado.

Para ésta solamente se tomó como referencia las dimensiones de longitud y ancho de todas las piezas ensambladas y se elaboró un sketch rectangular con una extrucción del grosor aproximado de una mesa para añadir sketches finales en cada esquina de la mesa para la simulación de las patas, lo cual nos dio un resultado como en la siguiente imagen (Illus.5).

Cabe resaltar que a esta parte se le añadió como material aluminio para hacer una ejemplificación más real de una mesa convencional.

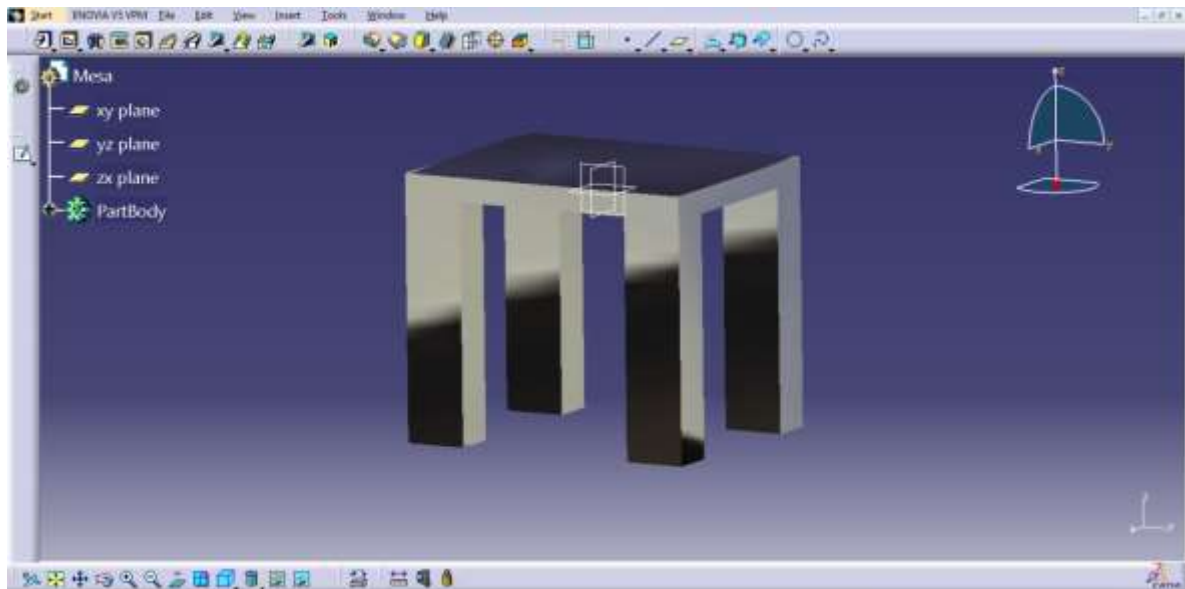
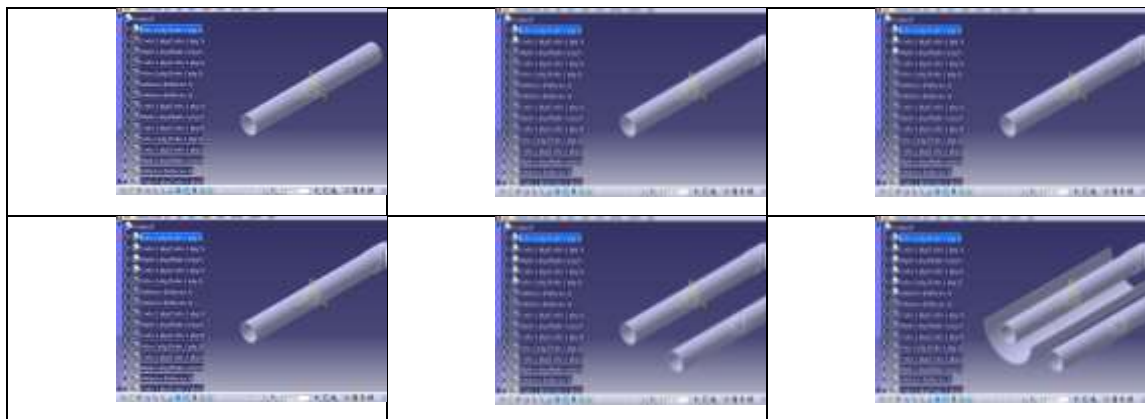
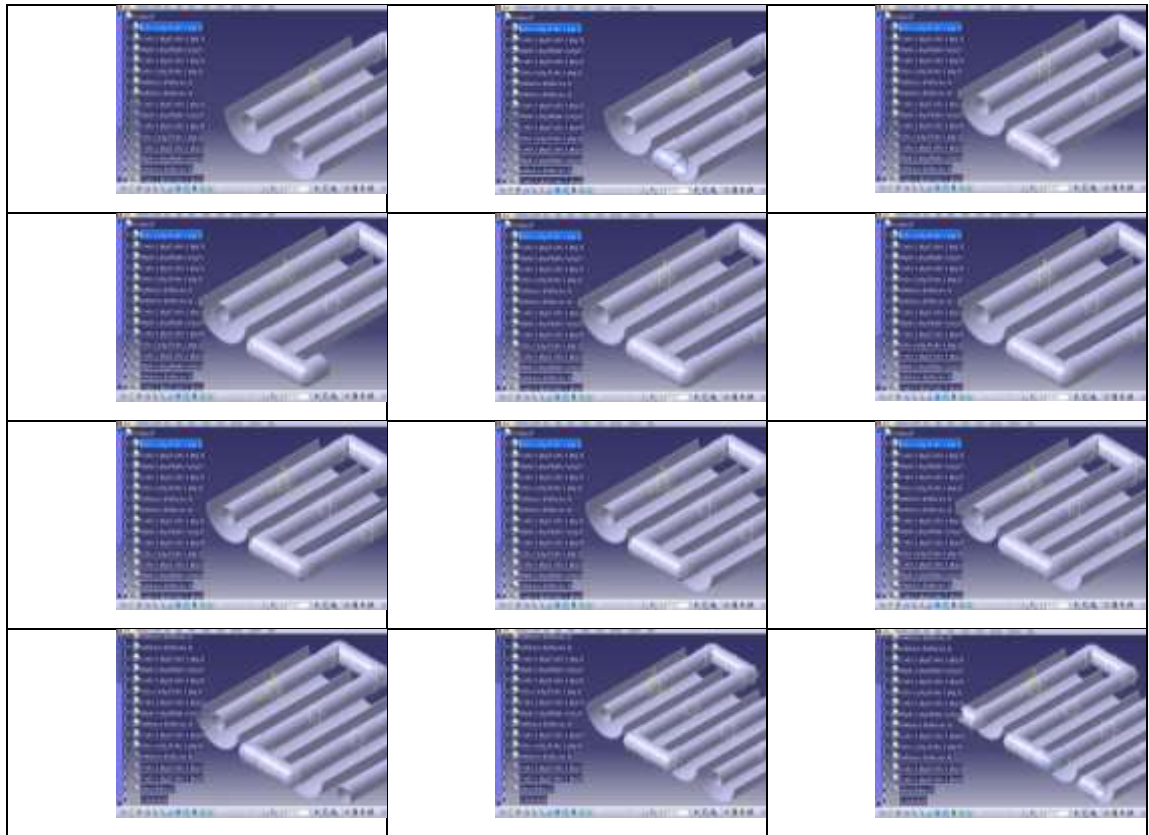


Ilustración 5. Mesa

Ensamblado

Para esta sección se tomó como ayuda el módulo de “Assembly design” en “Mechanical design”, y básicamente con la ayuda de las relaciones de posición o “Constrains” se ubicó pieza por pieza tomando como referencia un primer tubo de 2 plg. Fijo a nuestro plano, se siguió la siguiente secuencia:





Producto final

En la imagen (Illus.6) podemos observar cómo fue el resultado final del ensamblaje, por consiguiente, tomamos este como nuestro reactor ya armado, el producto final.

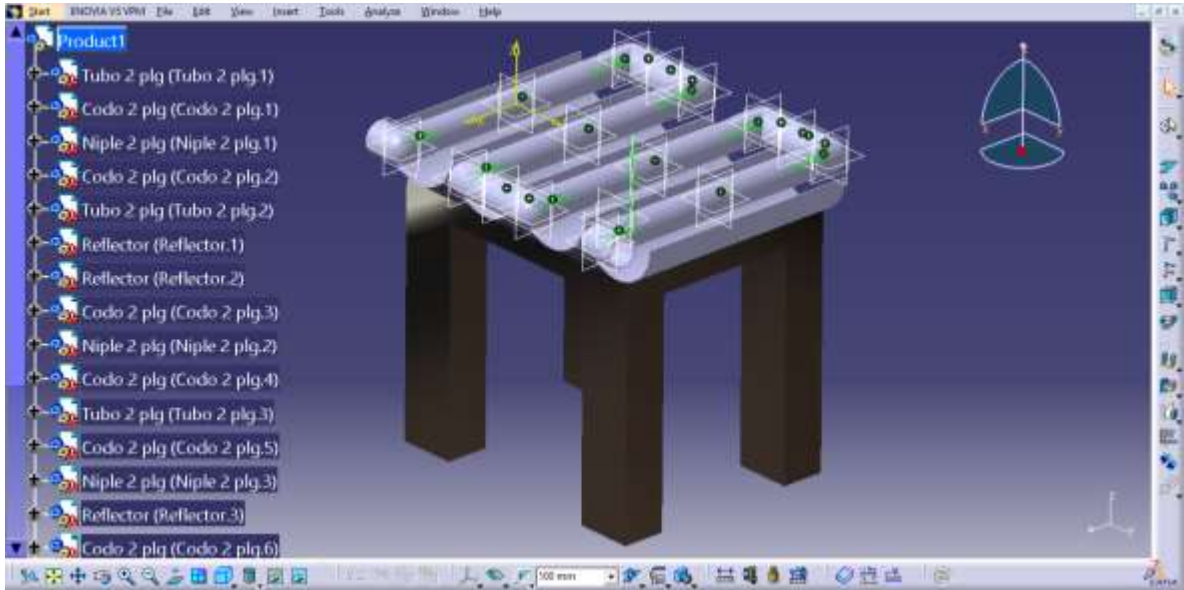
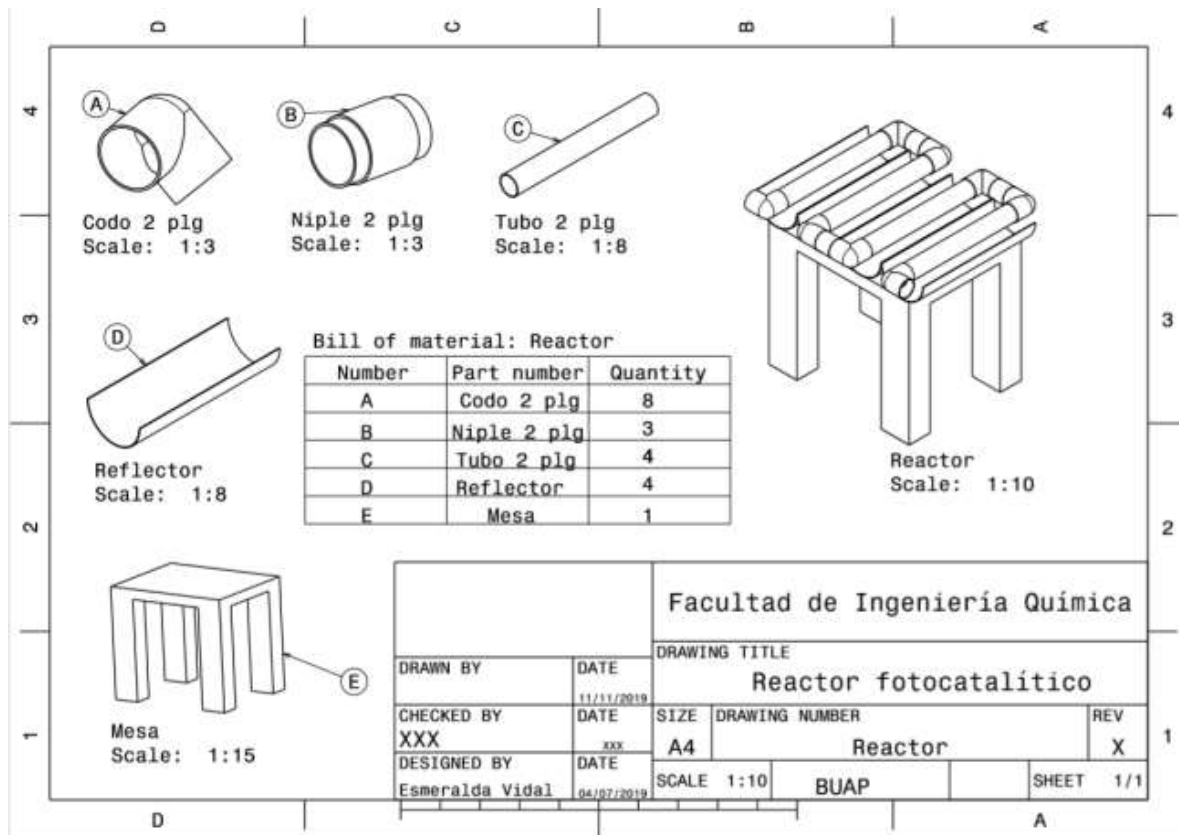


Ilustración 6. Ensamblaje final del reactor foto catalítico

Drafting

Por último podemos observar la imagen de nuestro producto final acotado y normalizado utilizando el módulo de “Drafting”; en la imagen (Illus.7) podemos observar cada una de las partes que componen a nuestro producto final (el reactor foto catalítico), además de dicho producto ensamblado con una lista del número total de componentes que se necesitaron para armar dicho ensamblaje y por último un cajetín con toda la información relevante (como lo es el autor, el título, la escala, etc.) respecto al reactor.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fox M. A., Dulay M. T. (1993). Heterogeneous Photocatalysis, Chemical Reviews, Vol. 93.
- [2] Weber, E.J., Adams, R.L., (1995). *Chemical and sediment-mediated reduction of the azo dyedisperse blue 79. Environmental Science and Technology.*
- [3] Margarita San Andrés, Natalia Sancho y José Manuel de la Roja. (2010), *Alquimia: Pigmentos y colorantes históricos.*
- [4] Bautista Luciano (2011). “*Degradación de Colorantes (Azul De Metileno) por Métodos Electroquímicos*”. Universidad Veracruzana Facultad De Ciencias Químicas Ingeniería Química. Veracruz, México.
- [5] Bafana, A., Saravana, S. y Chakrabarti, T. (2011). *Azo dyes: Past, present and future. Environmental Review*, 19(1), 350–370. doi:10.1139/A11-018.
- [6] A. Guzmán, A. Fernández y J. E. Rodríguez, “*Estudio de las reacciones de hidrólisis y condensación del titanio en presencia de acetilacetona*”, Rev. Acad. Colomb. Cienc., vol. 31.
- [7] Encarnación Carlos E. (2014). *Tratamiento de Efluentes Hospitalarios Mediante Fotocatálisis Heterogénea y Luz Visible.* Universidad Autónoma de Aguascalientes. Aguascalientes.
- [8] Carbajo Jaime (2013). *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂.* Universidad Autónoma de Madrid Facultad de Ciencias. Instituto de Catálisis y Petroleoquímica (CSIC): Madrid.
- [9] Yuste Pilar, Rebeca, (2003). “*Degradación Fotocatalítica del fenol*”, trabajo de fin de carrera, España, Universidad Rey Juan Carlos.
- [10] Blanca Vanesa López Muñoz, (2017). “*Remocion de azul de metileno mediante fotocatalisis heterogenea*”, trabajo de fin de carrera, Mexico, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- [11] Fox M. A., Dulay M. T. (1993). *Heterogeneous photocatalysis, chemical reviews*, Vol. 93, 341-357

- [12] Herrmann, J. (2012). *Titania – based true heterogeneous photocatalysis* *Environmental Science and Pollution Research*, 19(1), 3 655–3 665. doi:10.1007/s11356-011-0697-8
- [13] Blanco, J., Malato, S., Estrada, C., Bandala, E., Gelover, S. y Leal, T. (2014). *Purificación de aguas por fotocátalisis heterogénea: Estado del arte. Boletín Ambiental Estructplan*, 961(1), 51–76. Recuperado de <http://goo.gl/5jIofB> (diciembre, 2015).
- [14] Cassaignon, S., Cobeau, C. y Durupthy, O. (2013). *Titanium dioxide in photocatalysis*.
- [15] Gupta y Tripathi, 2011, Lazar, Varghese y Nair, 2012, *Nanomaterials: A danger or a promise? A chemical and biological perspective*, (pp. 153–188). doi:10.1007/978-1-4471-4213-3
- [16] Diesen, V. (2013). *Heterogeneous TiO photocatalysis – fundamental chemical aspects and effects of solid phase alterations*. (Disertación doctoral). Recuperado de Repositorio digital de KTH Royal Institute of Technology. (134 003)
- [17] Fabbri, D., Bianco, A. & Pramauro, E. (2006). *Effect of surfactant microstructures on photocatalytic degradation of phenol and chlorophenols*.
- [18] Environmental Protection Agency. (1998). *Handbook of advanced photochemical oxidation processes*. Recuperado de <http://goo.gl/WM3tY8> (Noviembre, 2015)
- [19] Poyatos, J., Muño, M., Almecija, M., Torres, J., Hontoria, E. y Osorio, F. (2010). *advanced oxidation processes for wastewater treatment: State of art. Water Air Soil Pollution*, 206(1). doi:10.1007/s11270-009- 0065-1
- [20] Espiga Lisbona García, Lucía (2016), “*Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción*”, Trabajo final maestría, España.
- [21] Hench, L. L. & West, J. K. *The sol-gel process*. *Chem. Rev.* 90, (1990).and, C.-C. W. & Ying*, J. Y. *Sol–Gel Synthesis and Hydrothermal Processing of Anatase and Rutile Titania Nanocrystals*. (1999). doi:10.1021/CM990180F
- [22] Rodriguez Santiago, Atalia. (2011). “*Regeneración de TiO (degussa p25) proveniente del proceso de degradación fotocatalítica de colorantes comerciales en medio acuoso*”, Tesis de ingeniería química, México, Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas.
- [23] Garces, Luis Fernando. (2008). “*FeCl3 y TiO2 interaction with H in the liquid waste treatment from the textile industry using artificial Light trough factorial model*”, Tesis de Doctor en Ingeniería, honolulu, hawai. Atlantic International University.

[24] Su, W., Chen, J., Wu, L., Wang, X., Wang, X. & Fu, X. (2008). *Visible light photocatalysis on praseodymium (iii)-nitrate-modified tio2 prepared by an ultrasound method. Applied catalysis b: environmental.*

[25] Zanella, R. (2014). *Aplicacion de los nanomaterials en catálisis. Mundo Nano*, 7(12), enero-junio

[26] Z. Li, B. Hou, Y. Xu, D. Wu, Y. Sun, W. Hu, F. Deng, “Comparative study of sol–gel-hydrothermal and sol–gel synthesis of titania–silica composite nanoparticles,” *Journal of Solid State Chemistry*, 178, p.p. 1395–1405, 2005

[27] S. Vives, C. Meunier, “Influence of the synthesis route on sol–gel SiO₂–TiO₂ (1:1) xerogels and powders,” *Ceramics International*, Article in Press, 2006.

[28] L. Zou, Y. Luo, M. Hooper, E. Hu, “Removal of VOCs by photocatalysis process using adsorption enhanced TiO₂–SiO₂ catalyst,” *Chem. Eng. And Proces*, 2006.

[29] X. Zhang, F. Zhang, K. Chan, “Synthesis of titania– silica mixed oxide mesoporous materials, characterization and photocatalytic properties,” *Applied Catalysis A: General*, 2005.

[30] Chandrappa K. G., y Venkatesha T. V. (2012). *Electrochemical Synthesis and Photocatalytic Property of Zinc Oxide Nanoparticles*. *Nano-micro Letters*, 4(1), 14-24. <http://doi.org/10.1007/BF03353686>

[31] Fabbri, D., Bianco, A. & Pramauro, E. (2006). *Effect of surfactant microstructures on photocatalytic degradation of phenol and chlorophenols*. *Applied Catalysis B: Environmental*: 62, 21-27

[32] Bickley R.I, onzalez-Carreno T., Lees J. S., Palmisano L., R. J. D. Tilley (1991). *Journal of Solid State Chemistry*.

[33] Rojas Lazo, Oswaldo; Rojas Rojas, Luis, *Diseño asistido por computador, Industrial Data*, vol. 9, núm. 1, 2006, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

[34] <https://solid-bi.es/solidworks/>

[35] <https://www.3ds.com/products-services/catia/?wockw=CATIA>

[36] Gomez, Gonzalez Sergio. (2015). *El gran libro de SolidWors*.

