

RESERVA DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO DE TITULO No. 04-2018-070614032000-203

VIGENCIA 20/06/2020 A 06/07/2021

ACTUALIZACIÓN 06/07/2021

ISSN 2594-1925

a cargo de la FCITEC



# RECIT

## REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS

VOLUMEN 4 CAPÍTULO 4

ISSN: 2594-1925



**FCITEC**  
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología  
Unidad Valle de las Palmas

2021  
Octubre-Diciembre



# Análisis del desempeño térmico de un sistema constructivo de ensamblado en clima cálido seco extremo

*Analysis of the thermal performance of an assembly constructive system in an extreme's dry warm climate*

Francisco Gibranny Curiel Sánchez <sup>1</sup>, Luisa Paola Murguía Tostado <sup>2</sup>, Gonzalo Bojórquez Morales <sup>1</sup>,  
Ixchel Astrid Camacho Ixta <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, Mexicali, C.P. 21280, Baja California, México

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universitario 1000. Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, C.P. 22260, Baja California, México

**Autor de correspondencia:** Gonzalo Bojórquez Morales, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, Mexicali, Baja California, México. E-mail: [gonzalobojoquez@uabc.edu.mx](mailto:gonzalobojoquez@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0001-9303-9278.

**Recibido:** 16 de Junio del 2021

**Aceptado:** 24 de Septiembre del 2021

**Publicado:** 14 de Octubre del 2021

**Resumen.** - *La calidad del ambiente térmico es determinante en la sensación térmica percibida del usuario, por lo que los efectos de los sistemas constructivos utilizados en la edificación son clave en la habitabilidad térmica del espacio. El conocer el desempeño térmico con la técnica de monitoreo permite una evaluación realista bajo las condiciones del microclima donde se construye. El objetivo de este estudio fue evaluar el ambiente térmico del periodo de transición y frío de dos viviendas construidas con un sistema constructivo de ensamblado (Thermorock), aplicado en muros y techo, para establecer las variaciones de temperatura de bulbo seco en su interior comparándolas con un caso base de un sistema de uso predominante en un clima cálido seco extremo (Mexicali, Baja California). Se desarrolló una estrategia de monitoreo con siete puntos de medición en una vivienda; dos puntos en otra y dos más en una vivienda de referencia, más un sensor al exterior en cada una de las viviendas. Se colocaron los sensores con base en la normatividad de ISO 7726 y ASTM 168 – 97. Los resultados indican que el sistema evaluado permite condiciones de confort térmico para los usuarios en un clima desértico.*

**Palabras clave:** Monitoreo térmico; Ambiente térmico; Habitabilidad térmica; Confort térmico; Sistema constructivo de ensamblado.

**Abstract.** - *The quality of the thermal environment is a determinant in the user's thermal perception, so the effects of the construction systems used in the building are key in the thermal habitability of the space. Knowing the thermal performance with the monitoring technique allows a realistic evaluation under conditions of the microclimate where it is built. The objective of this study was to evaluate the thermal environment of the period of transition and cold of two houses built with a assembly constructive system (Thermorock), applied in walls and roof, to establish the variations of dry bulb temperature in its interior comparing them with a base case of a system of predominant use in an extremous dry warm climate (Mexicali, Baja California). A monitoring strategy was developed with seven measuring points in one house; two points in the other and two more in a reference house, plus an outdoor sensor in each of the houses. The sensors were placed based on the standards of ISO 7726 and ASTM 168 - 97. The results indicate that the evaluated system allows thermal comfort conditions for users in a desert climate.*

**Keywords:** Thermal monitoring; Thermal environment; Thermal habitability; Thermal comfort; Assembly construction system.



## 1. Introducción

La necesidad de edificios de calidad que garanticen confort térmico se ha vuelto cada vez más evidente a raíz de los cambios en los hábitos de vida de sus ocupantes [1], de acuerdo a Morsy et al (2017), las personas viven al menos 90% de su vida al interior de edificios [2], es por ello que, el estudio de la calidad del ambiente interior adquiere una gran importancia. El patrón constructivo actual no toma en cuenta las variaciones climáticas, ni los materiales empleados en sus sistemas constructivos, en consecuencia, no se presentan condiciones de confort térmico, por ende, una nula habitabilidad interna [3].

Diversas investigaciones orientadas a evaluar la habitabilidad y calidad de la vivienda, reconocen la importancia del ambiente térmico [4], por su impacto en la salud de los habitantes, en el consumo de energía y su influencia en el cambio climático [5]. Múltiples variables influyen en el ambiente térmico interior; estos pueden ser internos, externos y los propios de la solución del diseño de la edificación. Dentro de los factores externos; se encuentra el microclima de la ciudad, así como, su latitud, altitud, temperatura, humedad relativa del aire, comportamiento del viento y la radiación solar. El ambiente térmico interior es influenciado por la solución arquitectónica; materiales, sistemas constructivos -conjunto de elementos y unidades de construcción-, así como acabados [6].

Con el fin de alcanzar los parámetros de confort térmico al interior de las viviendas, sus usuarios optan por el uso de aparatos de climatización. Esta problemática se aborda en enfoques económicos, políticos, ecológicos y sociales desde hace más de 30 años [7] en donde se concluyó que los excedentes de consumo de energía aumentan el costo y las emisiones contaminantes cuando el aire acondicionado funciona en un área con temperaturas más altas dentro de la misma ciudad [8], Santillán y García [9] abordan el tema con una

perspectiva ambiental, exponen una relación de círculo vicioso respecto al uso de sistemas mecánicos de climatización y el aumento de temperatura. En México el acondicionamiento térmico de estas edificaciones repercute en gran medida en la demanda pico del sistema eléctrico, siendo mayor su impacto en las zonas norte y costeras del país, en donde es más común el uso de equipos de enfriamiento que el de calefacción [10]. Los edificios consumen alrededor del 40% de energía, en gran proporción destinada para confort térmico en interiores [11-12]. De acuerdo a los datos del perfil energético de Baja California 2010–2020, la ciudad de Mexicali representa el 52.8% de consumo eléctrico de todo el Estado, esto se debe a que, durante la temporada de calor, el sector habitacional incrementa de modo significativo el uso de aparatos de aire acondicionado esto con el fin de mitigar la falta de confort térmico, lo cual implica sensación de incomodidad o molestia [7],[9], [13-17], entre otras consecuencias.

De modo que el uso excesivo de sistemas mecánicos de climatización, es una de las principales alternativas para generar microclimas que permitan alcanzar los parámetros de confort térmico al interior de las viviendas, pone en evidencia la ausencia de uso de sistemas constructivos que garanticen condiciones de confort térmico, así como la falta de adecuación de los edificios, al ambiente de la región [1]. Con base en lo señalado, es posible comprender que los métodos, sistemas y materiales utilizados en la construcción de las edificaciones en la región, no cumplen con los parámetros mínimos de habitabilidad en los espacios interiores, poniendo en riesgo “la presentación funcional, así como el apropiado desarrollo físico, social y mental de las condiciones de salud, seguridad, higiene, comodidad y privacidad” [18] de sus habitantes.



En climas con condiciones adversas, el uso de aislantes térmicos en edificios es necesario y gradualmente se vuelve un requisito en muchos países, particularmente en aquellos donde la energía se convierte en un recurso más valioso y demandado [19-20]. En México, la NOM-020-ENER-2011 regula la eficiencia energética en edificios de uso habitacional. Un edificio eficiente se logra cuando el ambiente interior es satisfactorio y el consumo de energía es mínimo [21]. Para el diseño de edificios energéticamente eficientes, es necesario identificar y evaluar los factores que incrementan la pérdida de energía en un edificio. Uno de los factores más relevantes son los puentes térmicos, los cuales se presentan en los materiales del sistema constructivo [22].

Atendiendo a la problemática presentada en la ciudad de estudio, así como en diversas regiones, se han empezado a desarrollar distintas alternativas con el fin de adaptarse a las necesidades requeridas para aumentar la calidad de vida de los usuarios. Esto por medio de materiales de construcción que priorizan la búsqueda de confort térmico como es el caso del sistema constructivo de ensamblado Thermorock [23].

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el comportamiento térmico del sistema constructivo de ensamblado (Thermorock) durante un periodo de transición y frío, en un clima cálido seco extremo como es el caso de la ciudad de Mexicali, Baja California. Los valores se determinaron por el método de monitoreo, el cual nos permite conocer de manera más acertada las condiciones térmicas del microclima creado por el sistema. Se realizó un análisis comparativo con un sistema de uso predominante en la región: bloque de concreto. Ambos sistemas se evaluaron con base a la normativa ISO 7726, ASTM 168 – 97, ASTM 1046 – 95 y ASTM 1155 – 95. Los comparativos fueron por diferencia de unidades de medida de las variables: Temperatura de Bulbo Seco, Humedad Relativa y Temperatura de Globo Negro.

Los resultados muestran que el sistema constructivo de ensamblado (Thermorock), permite condiciones de habitabilidad, pues logra un ambiente de confort térmico al interior.

## 2. Antecedentes

De acuerdo con la literatura revisada sobre el tema en cuestión, se presentan algunos estudios que han aportado conocimiento basado en pruebas científicas.

Manzano, 2017, en Ambato, Ecuador, por medio de su investigación menciona que para que exista un óptimo desarrollo de las capacidades y un mejoramiento en la vida de quien habite el espacio arquitectónico, es importante hacer una selección adecuada de su envolvente, tomando en cuenta aspectos de confort, que garanticen la habitabilidad y a su vez brinde un entorno sugestivo y de bienestar corporal y mental [24].

Asimismo, Villamagua, 2019, en Loja, Ecuador, realizó una investigación sobre vivienda y condiciones de habitabilidad, menciona que, la habitabilidad térmica corresponde a la sensación de una persona en relación a un ambiente, estrechamente relacionado con el confort térmico según los criterios de la ISO 7723. A su vez, aporta parámetros máximos y mínimos sobre temperatura y humedad relativa en relación al confort; tomando en cuenta, como variable principal para el bienestar térmico, a la envolvente de la vivienda [25].

Marchante y González, 2020, en La Habana, Cuba, en su aporte investigativo sobre modelos de confort, estrés térmico y zonas de confort, mencionan que, para que los modelos cumplan con los requerimientos básicos de análisis, se deben tomar en cuenta factores y parámetros, tanto ambientales, como personales, pues comunican que según la ASHRAE 55, el confort térmico se define como una condición



mental que expresa satisfacción en base al ambiente térmico [26].

González y Molina, 2017, en Bogotá, Colombia, realizaron un estudio sobre la envolvente arquitectónica, con el fin de demostrar su importancia en términos de habitabilidad, a su vez, la definen como el dispositivo que aporta protección al objeto arquitectónico, además de ser el intermediario entre; el aire, la luz y el calor, con el ambiente interior. Por medio de una sistemática revisión de documentación, concluyen que, para que la envolvente cumpla con los requisitos básicos de habitabilidad se debe someter a un riguroso y detallado proceso de diseño [27].

Molina, 2019, en Valencia, España, realizó un estudio del comportamiento térmico de la arquitectura habitacional, haciendo mención a los cuatro componentes en los que se da la interrelación entre el ambiente térmico y los organismos que lo habitan, entre ellos menciona la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del aire y la temperatura radiante. Asimismo, establece condiciones de confort térmico por medio del análisis de distintos elementos constructivos y ambientales [28].

Aunado a lo anterior, se puede comprender que, para una edificación de calidad, la selección adecuada de la envolvente, es un factor básico en cuestiones de habitabilidad y de bienestar térmico. Es por ello, que analizar los distintos sistemas constructivos pasa a ser un factor clave para el tema en cuestión.

Con relación al estudio de sistemas constructivos, Andrade, 2015, en el Estado de México, México, realizó una investigación donde analiza materiales de fácil anclaje y desensamble, detectando que existen características en los elementos constructivos para lograr espacios habitables, demuestra factores fisiológicos de dos tipos: estructurales y funcionales, este último relacionado a los agentes físicos del medio ambiente y al equilibrio térmico: temperatura y humedad ambiental [29].

A su vez, Fonseca, 2016, en Bogotá, Colombia, realizó una investigación de propuesta de diseño de vivienda de interés social modular, bajo criterios de habitabilidad, como un conjunto de condiciones físicas y no físicas que permiten la permanencia y comodidad humana en un lugar, entre otros. Concluyendo que el sistema constructivo de paneles tipo sándwich (OBS y el aislante), cumple con los requisitos básicos de habitabilidad [30].

Igualmente, Ramos, 2019, en Puebla, México, efectuó una investigación sobre sistemas constructivos para vivienda, tomando en cuenta rangos de confort térmico, bajo criterios de evaluación de las Naciones Unidas. Como conclusión se obtuvo que el Sistema Beno (sistema constructivo de ensamblaje), utilizado en cerramientos verticales, frente a otros sistemas constructivos hace que la vivienda tenga mejores condiciones y aislamiento térmico [31].

Por otra parte, Girón, 2014, en Ciudad de Guatemala, Guatemala, en su investigación de uso y aplicación del método constructivo Electropanel, retoma aspectos generales de habitabilidad y confort térmico. Como conclusión afirma que este tipo de sistema constructivo da mejores resultados como aislante térmico, en comparación con cada uno de los diferentes sistemas tradicionales de su región [32].

Además, Perea, 2012, en Colombia, Medellín, encontró que los sistemas constructivos ligeros, hablando específicamente de; PCH (Panel constructivo HOPSA), Durapanel y ICF PROFORM, sistemas constructivos de ensamblado, se han convertido en una potencial alternativa en comparación de los sistemas tradicionales, por sus distintas características que van desde, recorte en tiempos de construcción hasta factores de habitabilidad, como es el confort térmico [33].



Por igual, Vidal y Barona, 2019, en Santiago de Cali, Colombia, estudiaron diversos tipos de sistemas constructivos ligeros en vivienda, mediante dos tipos de aplicaciones: con cámara de aire y relleno de aislante térmico. Dentro de sus conclusiones se encuentra una aprobación de los sistemas de construcción ligeros, ya que poseen un potencial de aislamiento acústico, térmico y resistencia al fuego [34].

Además, Mendez, 2014, en Barcelona, España, por medio de su análisis de comparación entre el sistema tradicional de la región de estudio (bloque de concreto) y un sistema constructivo de ensamble (Emmedue), determinó que este último, permite alcanzar estándares de confort térmico, durante más horas, en comparación al tradicional [35].

Asimismo, Ronquillo, 2015, en Quito, Ecuador, por medio de su estudio comparativo entre los distintos sistemas constructivos tradicionales y el sistema de paneles de EPS, concluye que, por sus características, el ya mencionado permite obtener condiciones térmicas y de habitabilidad, creando espacios de confort y salud, en comparación a los materiales tradicionales utilizados en la construcción [36].

Desde otra perspectiva, Benavides, 2013, en Bogotá, Colombia, evaluó distintos sistemas constructivos, con el fin de promover la optimización de la calidad de la VIS, tomando en cuenta parámetros de confort, que permitan hacer la vivienda habitable. Por medio del método de comparación, concluyó que los sistemas constructivos de panel (ensamble), específicamente; el 3D panel (Panel EVG 3D), Royalco y Speedco (poliuretano expandido y fibrocementos), permiten mejores condiciones de confort térmico, acústico y de resistencia en comparación a los de mampostería [37].

En 2011, los investigadores Mandilaras, Stamatiadou, Katsourinis, Zannis y Founti en Grecia el comportamiento térmico de sistemas de ensamblado multicapa aplicados a una vivienda

sin habitar, concluyendo que, las capas de aislante aplicadas generaban una temperatura ambiente interior con una variación no significativa durante las 24 horas del día, además de un desfase de calor térmico en los muros de 30-40% de aproximadamente 100 minutos, en todas las habitaciones examinadas [1].

Posteriormente Mandilaras, Zannis y Founti continuaron su investigación con apoyo de Atsonios en 2014, donde evaluaron dos sistemas de ensamblado con diversos tipos de aislantes térmicos, considerando los parámetros de humedad en el ambiente y comparándolos entre ellos; se concluyó que añadir el panel aislado al vacío es 74% más eficiente térmicamente en fachadas [38].

En Australia, Ramakrishnan, Wang, Sanjayan y Wilson, 2017, experimentaron con sistemas de ensamblado ordinarios de la región, incorporaron diversos añadidos y aislantes. En los resultados se demostró que el prototipo con paneles de cemento reduce 2.8°C en un día típico durante el verano y 4.43°C durante el día de calor máximo en verano [39].

Con relación a los requerimientos de habitabilidad y comportamiento térmico en viviendas de interés social (VIS), Fonseca, 2019, en Colombia, Bogotá, por medio de su estudio, demuestra que, la materialidad actual (Muro en bloque estructural) de las viviendas en la región de estudio, no garantiza los parámetros necesarios de comodidad al interior, por lo que propone una serie de sistemas constructivos en panel y bloque que generan óptimas condiciones de confort térmico [40].

Asimismo, Molina, 2016, en Lima, Perú, con el fin de evaluar aspectos bioclimáticos de una vivienda, estudió el comportamiento térmico de los espacios interiores, por medio de sensores de estrés térmico, tomando en cuenta temperaturas y humedades relativas al interior y exterior de la vivienda, así como una estación



meteorológica, además de otros dos métodos (computacional y analítico). Los métodos utilizados resultaron apropiados para comparar los casos de estudio [41].

Al mismo tiempo, Sanchez, 2016, en Guadalajara, México, a través de su investigación, plantea una propuesta de adecuación bioclimática, con el fin de lograr condiciones de confort térmico y de habitabilidad. Bajo el método de monitoreo, analizó la temperatura y humedad relativa, así como el comportamiento térmico de la envolvente; hace uso de sensores de estrés térmico que registran ciertas variables meteorológicas como es: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, humedad relativa y temperatura de globo negro. De acuerdo a este estudio se lograron determinar estrategias térmicas de diseño [42].

De igual manera, Cárdenas, 2019, en Cuenca, Ecuador, en su investigación sobre el comportamiento térmico de envolventes multicapa, comparar distintos sistemas constructivos, con el fin de identificar cuál de ellos cumple con un correcto desempeño como aislante térmico y de pie a espacios de confort, bajo un enfoque experimental-cuantitativo, por medio del método de monitoreo [43].

Además, Campos, 2016, en Lima, Perú, realizó un análisis sobre confort térmico y habitabilidad en viviendas, por medio del método de monitoreo de la temperatura y humedad relativa en el interior y en el exterior. Se concluyó que, la habitabilidad y las condiciones de confort, están condicionadas por las estrategias bioclimáticas y el sistema constructivo de la vivienda [3].

En síntesis, los estudios revisados en este apartado, analizaron problemáticas que corresponden a la habitabilidad y confort térmico en relación con la envolvente de la edificación.

### 3. Consideraciones teóricas

Las consideraciones teóricas expuestas en este apartado facilitarán la comprensión de los conceptos utilizados en el presente trabajo y la importancia de los mismos, principalmente en función a la habitabilidad y confort térmico.

La función esencial de una vivienda es garantizar un ambiente interior adaptado a las necesidades del usuario y su confort [44-45]. El confort térmico es una característica de vital importancia en las viviendas, esto se refleja en los niveles de estrés térmico de sus ocupantes [44], [46]. De acuerdo a la norma ISO 7730:2005 de la ASHRAE, se define confort térmico como la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico [47].

Con relación al estudio de las sensaciones térmicas y la comodidad percibida, según la ISO 7730:2005, se evalúa el efecto del ambiente térmico en función de la sensación física y la satisfacción psicológica de los usuarios al espacio habitado [48].

Por otra parte, la habitabilidad térmica se define en relación a las horas en las que un espacio presenta condiciones de confort térmico [49].

Asimismo, se entiende como habitabilidad al producto resultante de una acertada aplicación de los principios básicos del diseño arquitectónico, donde se consideran aspectos tales como confort, funcionalidad y seguridad [50].

Es importante mencionar que el espacio habitable también se desarrolla como un factor relevante para la calidad de vida. Es por ello que dentro del concepto de bienestar habitacional se seleccionan criterios de relevancia térmica, tales como; temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire, temperatura media radiante, nivel de vestimenta y tasa metabólica [45], [51-52], así como las características



térmicas del sistema constructivo envolvente [53].

La habitabilidad térmica al interior de un espacio, debe garantizar una sensación de calidad en climas fríos y protección del calor en climas cálidos. La búsqueda por resolver esta cuestión de manera universal ha sido por mucho tiempo una preocupación para los diseñadores, uno de los objetivos de la arquitectura consiste en la satisfacción de sus usuarios a través del bienestar térmico [54].

Es por ello que es relevante tomar en cuenta los factores con los que se configuran los distintos sistemas constructivos, que a su vez permitan una comprensión precisa de su comportamiento al medio.

Se conoce como puente térmico a los elementos estructurales donde existe un intercambio de calor con mayor facilidad entre el interior y el exterior del edificio [12], la norma ISO 10211:2017 lo define como los cerramientos de un edificio donde la resistencia térmica, que es usualmente uniforme, presenta un cambio significativo debido a cambios geométricos: diferencias de conductividad térmica o grosores en los cerramientos [55].

Los puentes térmicos tienen un efecto directo sobre la demanda de consumo eléctrico ya que causa pérdida de calor durante temperaturas bajas y ganancia del mismo cuando la temperatura ambiente exterior es elevada [12].

La conductividad térmica es un factor importante a considerar ya que este determina la cantidad de calor que se transfiere mediante conducción, esta acción afecta directamente la cantidad de energía que consumirá un edificio [56]. La efectividad de un aislante térmico depende de su conductividad térmica y su capacidad para mantener sus características térmicas durante un tiempo determinado [19]. El uso de sistemas de ensamblado con propiedades de aislamiento térmico es clave para mejorar la eficiencia energética de un edificio [57].

Es habitual que el valor de la conductividad térmica publicada por las manufacturas se evalúe bajo condiciones de laboratorio: temperatura y humedad en control; es por ello que al instalarse en situ su valor de conductividad puede cambiar sustancialmente a lo predicho en laboratorio, por ello la importancia de evaluar su comportamiento [19].

La transferencia de calor, ya sea por conducción, radiación o convección, puede reducirse mediante aislantes térmicos en conjunto a sistemas constructivos apropiados [58]. La capacidad de un material en no transmitir la temperatura con facilidad está en función a su espesor, densidad y conductividad térmica, esta resistencia térmica en la industria de la construcción se le denomina factor R, una transmitancia baja representa un material más eficiente térmicamente [31],[58].

La inercia térmica es la capacidad del sistema de almacenar calor y variar su temperatura en determinado tiempo [31]. En la siguiente figura [Figura 1] se enlistan propiedades térmicas de los materiales convencionales y de ensamblado en la región:



PROPIEDADES TÉRMICAS DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS CONVENCIONALES Y ENSAMBLADO					
Material	Conductividad térmica (W/ m °C)	Calor específico (J / kg °C)	Densidad (kg/ m3)	Resistencia térmica (m2 °C / W)	Espesor (m)
<b>BLOQUE DE CONCRETO</b>					
Bloque de concreto pesado, relleno de concreto	1.01	837	1824	-	0.100
Mortero cemento-arena (exterior)	1.00	1000	1800	-	0.01
Yeso (interior)	0.42	837	1200	-	0.01
<b>TRIDIPANEL 2"</b>					
Tridipanel con recubrimiento de mortero en ambos lados	-	-	-	1.17	0.0508
<b>INSULPANEL 2"</b>					
Panel de poliuretano	0.026	1800	30.00	-	0.035
Acero con pintura blanca (exterior)	50.00	450	7800	-	0.005
Acero con pintura blanca (interior)	50.00	450	7800	-	0.005
<b>TABLAROCA ½" CON FIBRA DE VIDRIO</b>					
Tablaroca ½" con fibra de vidrio	-	-	-	2.118	-
<b>FOAMBLOCK</b>					
Foamblock	0.108	0.1012	510	-	0.126
Mortero cemento-arena (exterior)	1.00	1000	1800	-	0.01
Mortero cemento-arena (interior)	1.00	1000	1800	-	0.01
<b>MATERIALES</b>					
Fibrocemento	0.25	837	1900	-	0.006
Poliestireno expandido	0.16	1300	1050	-	-

Figura 1. Propiedades térmicas de sistemas constructivos. Fuente: [16],[59],[60].

Las propiedades térmicas del sistema constructivo Thermorock no se encuentran disponibles, sin embargo; este dato no es necesario en la técnica de monitoreo, ni relevante para el alcance de este artículo.

#### 4. Metodología, materiales y método

La metodología implementada en el desarrollo de la investigación está basada en los parámetros del método por monitoreo. Con el fin de cumplir el objetivo planteado, fue ejecutada una metodología general del estudio, con base a las etapas que se muestran de forma específica en el siguiente apartado, en el que se describe: Diseño de investigación, área de estudio, casos de estudio, caso base, periodo de estudio, instrumentos de medición, estrategia de instalación, así como procesamiento de datos.

#### 4.1 Diseño de investigación

La investigación desarrollada se aplicó a dos sistemas constructivos, éstos bajo un esquema metodológico con la técnica de monitoreo, que hace énfasis en la evaluación de ambientes con condiciones térmicas elevadas, específicamente en la siguiente situación; Verificación de cumplimiento del límite permisible del Índice de TBS (°C), HR (%) y TGN (°C) [61], lo antes descrito se esquematiza en la [Figura 2].

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN		
<b>Objeto de estudio:</b> Evaluar ambiente térmico de sistemas constructivos	<b>Parámetros de evaluación:</b> Confort térmico Variación de temperatura	<b>Método de evaluación:</b> Monitoreo
<b>ÁREA DE ESTUDIO</b>		
Región con clima cálido seco extremoso		
<b>CASOS DE ESTUDIO</b>		
Criterio de selección	Características físicas, espaciales y constructivas	Sistema constructivo de ensamblado
<b>CASO BASE</b>		
Criterio de selección	Características físicas, espaciales y constructivas	Sistema constructivo de uso predominante en un clima cálido seco extremoso
<b>PERIODOS DE ESTUDIO</b>		
Periodo de transición		Periodo de frío
<b>EQUIPOS DE MEDICIÓN</b>		
Criterio de selección de equipos		
<b>ESTRATEGIA DE INSTALACIÓN</b>		
Criterio de instalación y calibración de equipos		
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>		
<b>CONCLUSIONES</b>		

Figura 2. Método de investigación aplicado. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Área de estudio

El estudio se realizó en la ciudad de Mexicali, B.C., México [Figura 3], su tipo de clima BW, indica que la ciudad de Mexicali tiene un clima seco, muy árido, con un invierno lluvioso y una oscilación anual de temperaturas medias mensuales muy extremas [62].



**Figura 3.** Vista aérea de Mexicali, Baja California. Fuente: Imagen obtenida de Google Earth.

Su temperatura media anual es de 22.4 °C, la cual corresponde al periodo junio - septiembre con temperaturas medias superiores a 33.1 °C, y una media máxima de 42.2 °C; el periodo más frío corresponde a diciembre-enero con un promedio mensual de 12.4 °C. [63]. Su precipitación es escasa con 75 mm anuales, su insolación es abundante durante el verano, de 2,400 a 2,500 horas al año con una distribución uniforme. La velocidad del viento alcanza los 100 km/h [14].

#### 4.3 Casos de estudio

Los casos de estudio son dos viviendas construidas con un sistema constructivo de ensamblado (Thermorock), aplicado en muros y techo, en Mexicali, Baja California, por sus características y volumen de construcción, se les clasifica dentro de la categoría de “interés medio”.



**Figura 4.** Localización de los casos de estudio. Fuente: Imagen obtenida de Google Earth.

El sistema constructivo de ensamblado o material ligero (Thermorock), está formado por dos placas de cemento Portland mortero fibratado (mortero con celulosa), fibras naturales y aditivos adicionales.

#### 4.4 Caso de base

La selección del caso de base, corresponde a una vivienda, construida por un sistema convencional constructivo de uso predominante en regiones de clima cálido seco extremo, ubicada en Mexicali, Baja California. Dicho sistema es de bloque de concreto común 0.12m. Su procedimiento de construcción se rige por bloques de concreto de 0.12x0.20x0.40m unidos con mortero con proporción cemento-arena 1:3, con una junta de 0.01m de espesor entre cada pieza, con celda colada y varilla de acero de 3/8” colocada verticalmente a cada 0.60m de separación, con un acabado de mortero cemento-arena. [16, p.2].

#### 4.5 Periodo de estudio

Con base a los alcances de este documento, el criterio considerado para realizar el estudio, fue la transición térmica que da lugar entre el periodo de transición y el periodo frío; el estudio fue desarrollado del 24 de octubre al 19 de diciembre de 2020. En dos periodos de 30 días, el primero del 24 de octubre al 21 de noviembre, correspondiente al periodo de transición y el segundo del 21 de noviembre al 19 de diciembre, al periodo de frío.

#### 4.6 Instrumentos de medición

La temperatura de bulbo seco (TBS), temperatura de Globo Negro (TGN) y humedad relativa (HR), fueron medidos mediante sensores de estrés térmico RC-51H certificado EN12830, CE, RoHS; para la medición del Globo Negro se modificaron dos de ellos: se les añadieron una pelota de plástico con 8.5 cm diámetro de color negro. Cada sensor fue



calibrado y programado en campo. Este sensor corresponde a la carga neta de calor a las que se exponen los usuarios de las viviendas estudiadas, condiciones dadas por el microclima de cada sistema constructivo.

Para garantizar la confiabilidad los resultados obtenidos e instalación de cada sensor se aplicaron normas de la organización, American Society for Testing and Materials (ASTM) [64] y normas de la International Standardization Organization (ISO) [65]. Estas normas refieren sobre aspectos de materiales aislantes, métodos para medición de temperatura ambiente y estándares para establecer criterios y zonas de confort para cierto rango de individuos, las normas aplicadas se enlistan en la siguiente figura 5.

NORMA	TÍTULO
ASTM C 168-97	Standard Terminology Relating to Thermal Insulating Materials.
Establece definiciones, símbolos, unidades y abreviaturas de términos utilizados por las normas de la organización referentes al tema.	
ISO 7726: 1998	Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities
Establece los criterios para el desarrollo de un monitoreo térmico, define los materiales e instrumentos adecuados para la medición de temperaturas de bulbo seco y globo negro, así como su colocación en distintos tipos de superficies y espacios.	

Figura 5. Método de investigación aplicado. Fuente: Jiménez, V. [66]

#### 4.7 Estrategia de instalación

En una de las viviendas (Casa 1) se colocaron ocho puntos de medición: 3 exteriores y 5 interiores. En la segunda vivienda de estudio (Casa 2) se colocaron dos sensores interiores. Finalmente, en la vivienda tipo base se colocaron tres sensores: dos de ellos en el interior y uno en el exterior.

Los sensores de estrés térmicos ubicados en la Casa 1, se nombraron de la siguiente manera; Temperatura Exterior (C1-THE), Temperatura Interior (C1-SALATH), Globo Negro (C1-GN), Muro Sur Exterior (C1-MSE), Muro Sur Interior (C1-MSI), Muro Oeste Interior (C1-MOI),

Temperatura Techo Exterior (C1-TCE), además, Temperatura Techo Interior (C1-TCI) [Figura 5].

En cuanto a los sensores instalados en la Casa 2, se nombraron de la siguiente manera; Muro Sur Interior (C2-MPI) y Temperatura Interior (C2-SALATH) [Figura 6].

Asimismo, para la vivienda tipo base se utilizaron las siguientes nomenclaturas; Temperatura Exterior (CB-THE), Temperatura Interior (CB-THI), además de, Globo Negro (CB-GN).

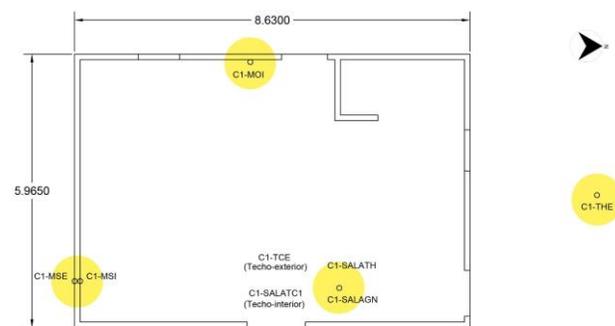


Figura 6. Ubicación de los sensores en Casa 1. Fuente: Elaboración propia.

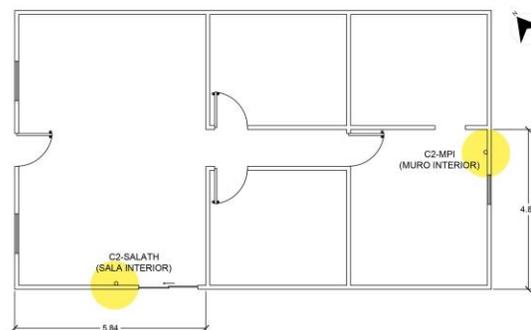


Figura 7. Ubicación de los sensores en Casa 2. Fuente: Elaboración propia.

### 5. Resultados y discusiones

El tiempo de evaluación abarca el periodo de octubre-diciembre, donde se considera como transición al periodo de octubre-noviembre y de frío noviembre-diciembre. Para el análisis de



este trabajo se tomaron los días críticos de ambos períodos, se consideran críticos al ser los días donde se registra la temperatura de bulbo seco más elevada en el exterior de las viviendas de su respectivo ciclo de observación; para el tiempo de transición se analizó el día 04 de noviembre, en frío es el día 22 de noviembre. Los datos considerados para la evaluación son los registros de Temperatura de Bulbo Seco (TBS) y Humedad Relativa (HR) de los monitores de estrés térmico y la Temperatura de Globo Negro (TGN) capturada por el monitor de Globo Negro (variables con terminación GN).

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede confirmar que el sistema constructivo de ensamblado (Thermorock) permite condiciones de confort térmico por más tiempo, así como periodos prolongados continuos, esto en comparación al sistema de uso predominante en la región (bloque de concreto), como se aprecia en la siguiente [Figura 16].

### 5.1 Monitoreo de casa con sistema constructivo de ensamblado (C1)

Este análisis consiste en la comparación en el comportamiento durante ambos periodos de estudio, transición y frío, en la Casa 1 (C1), en esta vivienda se colocaron ocho sensores de estrés térmico, de los cuales se utilizaron dos del interior: Globo Negro (C1-SALAGN), de Ambiente interior (C1-SALATH); y uno de exterior: Ambiente exterior (C1-THE). En el monitoreo se observa que el sistema constructivo de ensamblado (Thermorock) la TBS y TGN en el interior de la vivienda se comportan de manera similar durante el periodo de transición [Figura 8], ambos sensores registraron TBS y TGN máxima de 29°C en el mismo horario, mientras que el valor mínimo de los mismos en menor a 1°C; este comportamiento se repite durante el periodo de frío [Figura 9], el retraso térmico en los puntos máximos TBS y TGN es de 9 horas con una diferencia de 1.4°C y en su punto mínimo de 2 horas; esto significa que el microclima creado por este sistema constructivo

es afectado por la radiación infrarroja un 0.2°C durante el periodo de transición y 1.4°C en frío, de acuerdo con esta observación, se puede afirmar que la sensación térmica es igual o similar a la registrada por TBS.

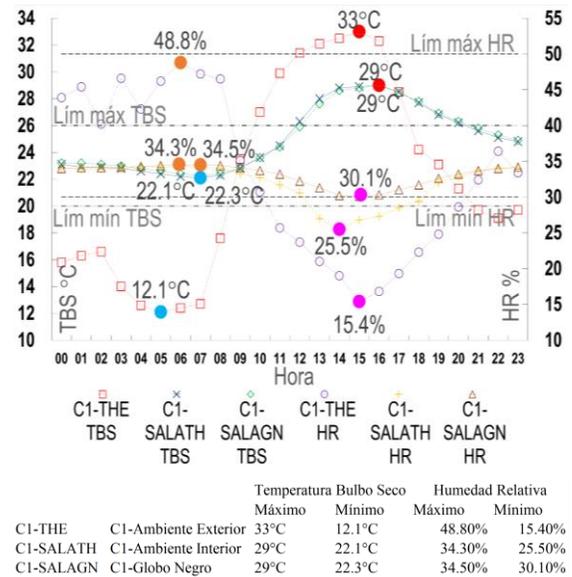


Figura 8. Día crítico (04/11/20) y comparación de C1-THE vs C1-SALATH vs C1-SALAGN en periodo de transición (Thermorock). Fuente: Elaboración propia.

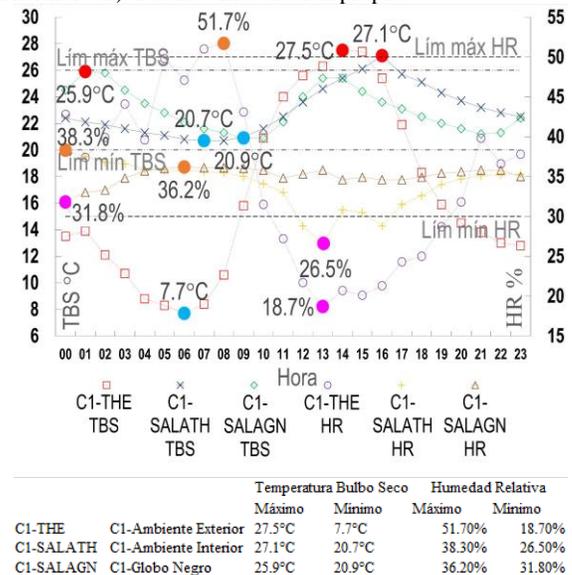


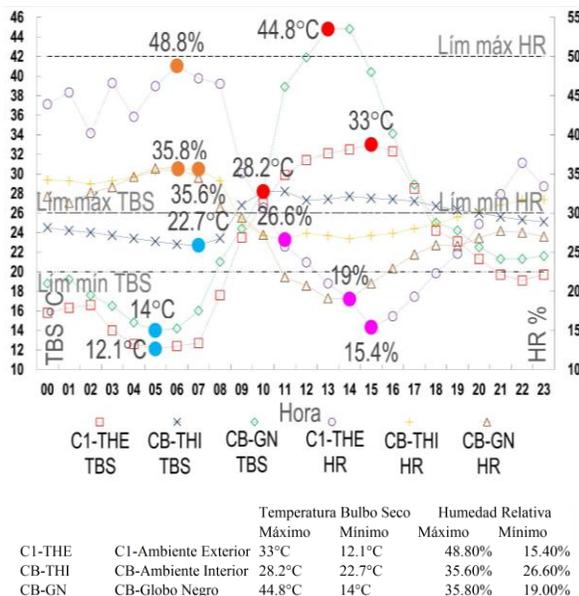
Figura 9. Día crítico (22/11/20) y comparación de C1-THE vs C1-SALATH vs C1-SALAGN en periodo de frío (Thermorock). Fuente: Elaboración propia.



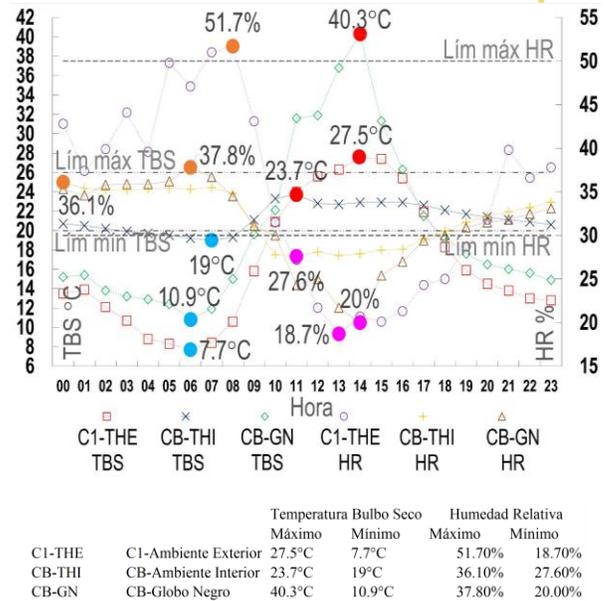
## 5.2 Monitoreo de casa base, sistema constructivo convencional (CB)

De manera análoga, se realizó una comparativa en la casa base (CB), construida con bloque de concreto común, el análisis requirió de ambos monitores instalados en el interior: Globo Negro (CB-GN) y de Ambiente interior (CB-THI); en conjunto con el monitor de Ambiente exterior de la Casa 1 (C1-THE).

Durante el periodo de transición [Figura 10] el comportamiento en la TBS marca una oscilación entre su punto máximo y mínimo de 5.5°C, en el caso de TGN la oscilación es de 30.8°C, lo que resulta en una diferencia en oscilaciones de 25.3°C. En el periodo de frío [Figura 11] ocurre un comportamiento similar, la diferencia de oscilación entre TBS y TGN es de 24.7°C. Lo anterior representa que la sensación térmica será mayor a la registrada en TBS, contrario a la vivienda con sistema de ensamblado.



**Figura 10.** Día crítico (04/11/20) y comparación de C1-THE vs CB-THI vs CB-GN en periodo de transición (Bloque de concreto). Fuente: Elaboración propia.

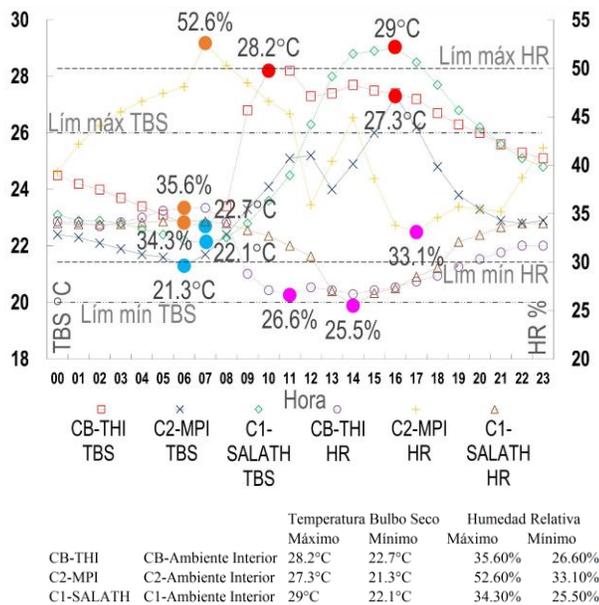


**Figura 11.** Día crítico (22/11/20) y comparación de C1-THE vs CB-THI vs CB-GN en periodo de frío (Bloque de concreto). Fuente: Elaboración propia.

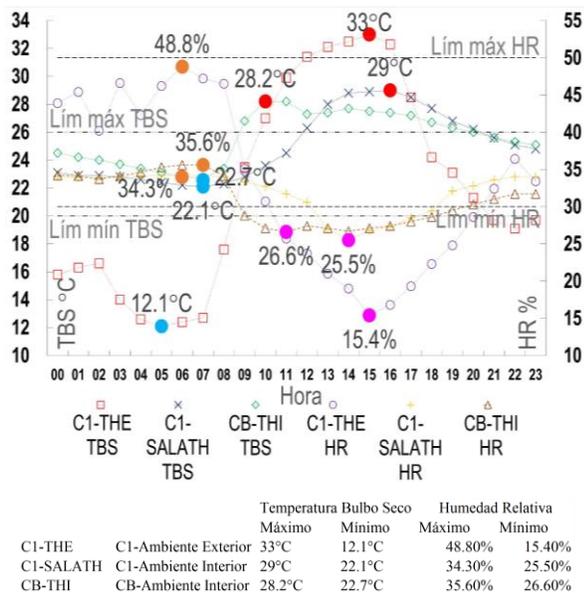
## 5.3 Comparativo en periodo de transición

La estrategia de análisis en periodo de transición consiste en concentrar el comportamiento de los monitores de Ambiente interior en las viviendas estudiadas: CB-THI, C2-MPI y C1-SALATH, con la finalidad ilustrar el desempeño térmico en TH y HR de ambos sistemas constructivos. El segundo enfoque es una comparación directa de los monitores de ambiente de ambos sistemas constructivos (C1-SALATH y CB-THI) con respecto a la temperatura exterior.

Durante el periodo de transición ambos sistemas constructivos tienen un comportamiento similar en TBS, un margen de diferencia en su oscilación de TBS de 1.4°C [Figura 12], sin embargo; la sensación térmica reflejada, debido al efecto de radiación infrarroja, es distinta, en el sistema constructivo de bloque de concreto, se percibe una temperatura mayor y menor a las temperaturas más altas y baja registradas respectivamente. En lo que refiere a la humedad relativa la sensación de humedad en el ambiente con el sistema de ensamblado presenta un 0.20% menos oscilación y 5 horas más de confort que la registrada por el bulbo húmedo del sistema de uso predominante cuya sensación es de sequedad [Figura 13].



**Figura 12.** Día crítico (04/11/20) y comparación de CB-THI, C2-MPI, C1-SALATH en periodo de transición (Thermorock y bloque de concreto). **Fuente:** Elaboración propia.

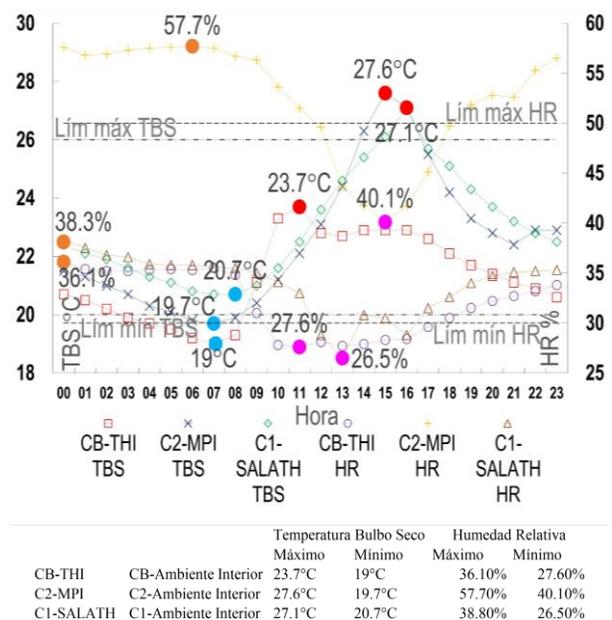


**Figura 13.** Día crítico (04/11/20) y comparación de C1-THE, C1-SALATH, CB-THI en periodo de transición (Thermorock y bloque de concreto). **Fuente:** Elaboración propia.

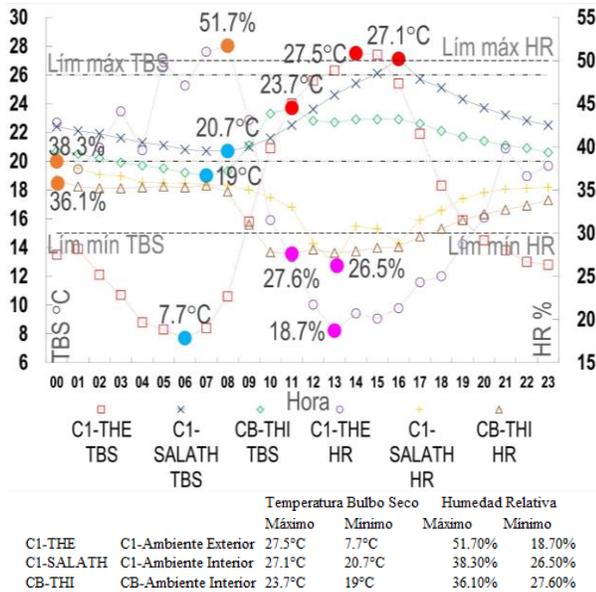
### 5.4 Comparativo en periodo de frío

Para el análisis en el periodo de frío se siguió la misma estrategia que en el periodo de calor. En este periodo la temperatura de bulbo seco del

interior de la vivienda construida con sistema de ensamblado (Thermorock) presentó un total de 22 horas dentro de la zona de confort, que representa 4 horas más de confort respecto al caso base [Figura 14]. En el caso de humedad relativa se observó que es más estable la registrada por la vivienda (CB) por 3.80%; mientras que la humedad relativa de la vivienda de ensamblado ofrece 5 horas más en confort [Figura 15], al igual que en el periodo de transición, el efecto de radiación infrarroja desfavorece la sensación de humedad del sistema constructivo de uso convencional creando una sensación de falta de humedad en el ambiente.



**Figura 14.** Día crítico (22/11/20) y comparación de CB-THI, C2-MPI, C1-SALATH en periodo de frío (Thermorock y bloque de concreto). **Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 15.** Día crítico (22/11/20) y comparación de C1-THE, C1-SALATH, C1-CB-THI en periodo de frío (Thermorock y bloque de concreto). **Fuente:** Elaboración propia

### 5.5 Síntesis de horas en confort

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede confirmar que el sistema constructivo de ensamblado (Thermorock) permite condiciones de confort térmico por más tiempo, así como periodos prolongados continuos, esto en comparación al sistema de uso predominante en la región (bloque de concreto), como se aprecia en la siguiente [Figura 16].

Periodo de Transición (04/11/20)		
Casa	Temperatura de Bulbo Seco	Humedad Relativa
C1 (Thermorock)	15 horas	18 horas
C2 (Thermorock)	22 horas	22 horas
CB (Bloque de concreto)	13 horas	13 horas
Periodo de Frío (22/11/20)		
Casa	Temperatura de Bulbo Seco	Humedad Relativa
C1 (Thermorock)	22 horas	21 horas
C2 (Thermorock)	18 horas	7 horas
CB (Bloque de concreto)	18 horas	16 horas

**Figura 16.** Cantidad de horas de confort TBS y HR durante el día crítico de periodo de Transición (04/11/20) y periodo Frío (22/11/20). **Fuente:** Elaboración propia.

## 6. Conclusiones

Durante el periodo de transición el sistema constructivo de ensamblado presentó 2 horas (8.33%) más de confort en TBS y 8 horas (33.33%) más en sensación térmica TGN. En lo que respecta al periodo de frío, 4 horas (16.66%) más de confort en TBS, 22 (91.66%) horas más en sensación térmica. En ambos periodos, 5 horas (20.83%) más de confort en HR; los resultados anteriores en comparación al de bloque de concreto.

El sistema constructivo de ensamblado (Thermorock) es afectado en un rango de 0.20°C-1.4°C por la radiación infrarroja, por lo que la sensación térmica percibida por el usuario será similar a la registrada por los monitores de TBS.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema constructivo de ensamblado (Thermorock) estudiado:

1. Genera condiciones de ambiente térmico que facilitan entrar a los parámetros de confort en comparación del sistema constructivo de uso predominante en la región de Mexicali.
2. Existe la posibilidad de disminuir las horas de funcionamiento de sistemas de aclimatación para conseguir confort térmico.
3. Satisface criterios de habitabilidad en cuestión térmica, a favor de calidad de vida de quien habita el espacio.

Es necesario resaltar que el alcance del artículo es la evaluación del ambiente generado por el sistema constructivo de ensamble (Thermorock), no se evaluaron sus propiedades físicas por lo que se propone en futuras investigaciones se realicen estudios de laboratorio. De misma forma, se invita a realizar estudios donde se evalúe su eficiencia energética en sistemas de aclimatación, esto



con relación a un ahorro económico y ambiental, con una perspectiva a la sustentabilidad. Además, se propone que, en futuras investigaciones, se plantee la capacidad del material en cumplir con los demás aspectos de habitabilidad, es decir, en la acústica, ventilación, confort visual y confort espacial.

## 7. Reconocimiento de autoría

*Francisco Gibranny Curiel Sanchez:* Metodología; análisis formal; investigación; curación de datos; escritura-borrador original; escritura-revisión y edición; visualización. *Luisa Paola Murguía Tostado:* Metodología; análisis formal; investigación; curación de datos; escritura borrador original; escritura-revisión y edición; visualización. *Ixchel Astrid Camacho Ixta:* Conceptualización; recursos; escritura-revisión y edición; supervisión; administración de proyecto; adquisición de fondos. *Gonzalo Bojórquez Morales:* Validación, recursos; escritura-revisión y edición; supervisión.

## Referencias

- [1] I. Mandilaras, M. Stamatiadou, D. Katsourinis, G. Zannis, M. Founti, “Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls”, *Building and Environment*, vol. 61, pp. 93-103, marzo, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.12.007>
- [2] M. Morsy, M. Fahmy, H. Abd, A. Belal, “Effect of Thermal Insulation on Building Thermal Comfort and Energy Consumption in Egypt”, *ICaTAS*, vol. 42, pp. 280-292, septiembre, 2017. <https://dx.doi.org/10.21608/jesaun.2014.115057>
- [3] X. Campos, “Confort térmico y habitabilidad de la vivienda en el AA. HH. Edén del Manantial, en las lomas costeras de El Paraíso”, *Investiga Territorios*, vol. 4, pp. 107-123, septiembre, 2016. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/investigaterritorios/article/view/21455>
- [4] I. Nieto, J. Robles, G. Arista, “Habitabilidad en la Vivienda de Interés Social en San Luis Potosí. Confort y aislamiento Térmico, San Luis Potosí, México”, *Congreso Nacional de Vivienda*, CDMX, México, 2015.

[https://www.researchgate.net/publication/337720980\\_Habitabilidad\\_en\\_la\\_Vivienda\\_de\\_Interes\\_Social\\_en\\_San\\_Luis\\_Potosi\\_Confort\\_y\\_Aislamiento\\_Termico](https://www.researchgate.net/publication/337720980_Habitabilidad_en_la_Vivienda_de_Interes_Social_en_San_Luis_Potosi_Confort_y_Aislamiento_Termico)

- [5] O. García, A. Camargo, N. Santillán, S. Ojeda, E. Nieblas, M. Quintero, R. Soto, “El cambio climático global y escenarios climáticos en Mexicali, Baja California, México”, *Baja California ante el embate del cambio climático*, B. C.: UABC, 2013. [https://www.researchgate.net/publication/236176762\\_El\\_cambio\\_climatico\\_global\\_y\\_escenarios\\_climaticos\\_en\\_Mexicali\\_Baja\\_California\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/236176762_El_cambio_climatico_global_y_escenarios_climaticos_en_Mexicali_Baja_California_Mexico)
- [6] D. González, J. Véliz, “Resiliencia urbana y ambiente térmico en la vivienda”, *Arquitectura y Urbanismo*, vol. 37, pp. 63-73, mayo-agosto 2016. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376846860005>
- [7] J. Suástegui, C. Pérez, H. Campbell, H. Magaña, “Prospectiva del Programa de “Ahorro Sistemático Integral en Mexicali, Baja California, México”, *Ingenier. Mecáni. Tecnol. Desarroll*, vol. 4, pp. 129-134, marzo, 2013. <http://ref.scielo.org/qwf92z>
- [8] N. Santillán, O. García, G. Peñuelas, J. López, S. Ojeda, N. Velázquez, S. Cruz, “Análisis comparativo de emisiones de CO2 y su impacto económico en dos complejos habitacionales de Mexicali, México”, *X Congreso Internacional AEC*, Alicante, España, 2016, pp. 613-622. <http://hdl.handle.net/10045/58027>
- [9] N. Santillán, O. García, *Ambiente urbano 2050*. Mexicali: Universidad Autónoma de Baja California, 2018. <https://www.researchgate.net/publication/329254227>
- [10] NOM-020-ENER-2011 “Guía de Cálculo”. México, 2017.
- [11] L. Yang, H. Yan, J. Lam, “Thermal comfort and building energy consumption implications - A review” *Applied Energy*, vol. 115, pp. 164-173, febrero 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.062>
- [12] I. Garrido, S. Lagüela, P. Arias, J. Balado, “Thermal-based analysis for the automatic detection and characterization of thermal bridges in buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 1358-1367, enero, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.031>



- [13] A. Campos, N. Santillán, O. García, A. Lambert, G. Bojórquez, “Energy and Environmental Comparison between a Concrete Wall with and without a Living Green Wall: A Case Study in Mexicali, Mexico”, *Sustainability* vol. 12, no. 13, pp. 52-65, junio, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12135265>
- [14] M. Brihuega, “Conjunto habitacional de interés social sustentable con certificación LEED desarrollo urbano V4, en la ciudad de Mexicali, B.C.”, Trabajo de maestría, Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano, ITESO, *Guadalajara, Jalisco*, 2019. <https://rei.iteso.mx/handle/11117/6202?show=full>.
- [15] R. Gallegos, N. Velázquez, A. Luna, “Simulación Dinámica y Estudio Comparativo de diferentes Configuraciones de Sistemas de Enfriamiento Evaporativo para Mexicali, México”. *Información tecnológica*, vol. 21, no. 2, pp. 45-58, septiembre, 2010. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000200007>
- [16] A. García, J. Cadena, G. Bojórquez, A. Luna, J. Vázquez, “Confort Térmico y Consumo Energético por uso de Sistemas Constructivos para Muros, en Mexicali, Baja California, México”, *CTSNEs*, CHH, 2011. [https://www.researchgate.net/publication/315584401\\_Confort\\_Termico\\_y\\_Consumo\\_Energetico\\_por\\_uso\\_de\\_Sistemas\\_Constructivos\\_para\\_Muros\\_en\\_Mexicali\\_Baja\\_California](https://www.researchgate.net/publication/315584401_Confort_Termico_y_Consumo_Energetico_por_uso_de_Sistemas_Constructivos_para_Muros_en_Mexicali_Baja_California)
- [17] C. Espinosa, A. Cortés, “Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante” *INVI*, vol.30, no. 85, pp. 227-242, noviembre, 2015. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582015000300008>
- [18] R. D’Alençon, C. Justiniano, F. Márquez, C. Valderrama, “Parámetros y estándares de habitabilidad: calidad en la vivienda, el entorno inmediato y el conjunto habitacional”, *Camino al Bicentenario: Propuestas para Chile*, Chile: Universidad Católica de Chile, 2008. [https://www.researchgate.net/publication/237832171\\_Parametros\\_y\\_estandares\\_de\\_habitabilidad\\_calidad\\_en\\_la\\_vivienda\\_el\\_entorno\\_inmediato\\_y\\_el\\_conjunto\\_habitacional](https://www.researchgate.net/publication/237832171_Parametros_y_estandares_de_habitabilidad_calidad_en_la_vivienda_el_entorno_inmediato_y_el_conjunto_habitacional)
- [19] A. Abdou, I. Budaiwi, “The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content”. *Construction and Building Materials*, vol. 43, pp. 533-544, Junio, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.058>
- [20] U. Berardi, “A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends”, *Resources, Conservation and Recycling*, vol 123, pp. 230-241, Agosto, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.014>
- [21] Y. Wu, J. Wang, P. Monteiro, M. Zhang, “Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings”, *Construction and Building Materials*, vol. 87, pp. 100-112, Julio, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.004>
- [22] J. Sadauskiene, J. Ramanauskas, Vasylius, A. “Impact of point thermal bridges on thermal properties of building envelopes”, *Thermal Science* PY, vol. 24, no. 3, Septiembre, 2020. <https://doi.org/10.2298/TSCII80719299S>
- [23] C. López, “El panel Thermorock: Una alternativa para la construcción sustentable. Sistemas sustentables de México S. de R.L de C.V.” Instituto Tecnológico de Tijuana, Tijuana, Baja California, México, 2012. [http://thermorock.weebly.com/uploads/2/7/8/9/27893831/ponencia\\_foro\\_regional.pdf](http://thermorock.weebly.com/uploads/2/7/8/9/27893831/ponencia_foro_regional.pdf)
- [24] D. Manzano, “Acondicionamiento térmico de los espacios interiores en la Unidad Educativa “General Córdoba” de la ciudad de Ambato en el periodo 2017”, Tesis de grado, Facultad de Diseño, Arquitectura y Artes, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2017. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/26411>
- [25] Villamagua, D. “Estudio del hábitat urbano: vivienda y condiciones de habitabilidad del asentamiento de Hecho Gordillo De Belén, Loja-Ecuador”, Tesis de grado, Facultad para la Ciudad, el Paisaje y la Arquitectura, UIDE, Loja, Ecuador, 2019. <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/3091>
- [26] G. Marchante, A. González, “Evaluación del confort y desconfort térmico”, *EAC*, vol. 41, no. 3, pp. 21-40, Septiembre, 2020. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59282020000300021#t2](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282020000300021#t2)
- [27] M. González, L. Molina, “Envoltente arquitectónica: un espacio para la sostenibilidad”,



*Arkitekturax Visión FUA*, vol. 1, no. 1, pp. 49-61, 2018.  
<https://doi.org/10.29097/26191709.201>

[28] Molina M. “Estudio del comportamiento térmico de la arquitectura habitacional y patrimonial de Santa Cruz de la Sierra Bolivia”, Trabajo final de máster, Escuela Técnica Superior Ingeniería de Edificación, UPV, Valencia, España, 2019.  
<http://hdl.handle.net/10251/128663>

[29] M. Andrade, “Sistema constructivo modular con materiales alternativos que favorezca a la flexibilidad en la construcción de vivienda”, Trabajo fin de máster, Facultad de Arquitectura y Diseño, UAEM, Toluca de Lerdo, Edomex, 2015.  
<http://hdl.handle.net/20.500.11799/79937>

[30] L. Fonseca, “Diseño de vivienda de interés social modular para zona de emergencia de alta vulnerabilidad”, Trabajo de grado, Facultad Ingeniería, UPC-UniPiloto, Bogotá, D.C., 2016.  
<http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00003259.pdf>

[31] P. Ramos, “Estudio de sistemas constructivos para vivienda en Puebla, México”, Trabajo de fin de grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, UPM, Madrid, España, 2019. <http://oa.upm.es/55883/>

[32] M. Girón, “Uso y aplicación del método constructivo electropanel”, Tesis de grado, Facultad de Arquitectura, USAC, Guatemala, Guatemala, 2014.  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02\\_3738.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02_3738.pdf)

[33] Y. Perea, “Sistemas constructivos y estructurales aplicados al desarrollo habitacional”, Tesis de fin de máster, Facultad de Ingeniería Civil, UdeMedellín, Medellín, Antioquia, 2012.  
<http://hdl.handle.net/11407/359>

[34] S. L. Vidal and J. Barona. *Análisis y evaluación del desempeño térmico del sistema de construcción liviana en seco en edificaciones de vivienda* 1er. ed. Santiago de Cali: SENA Centro de la construcción, 2019.  
<https://hdl.handle.net/11404/6247>

[35] K. R. Méndez. “Paneles estructurales de poliestireno expandido: análisis energético en el clima tropical- húmedo de santo domingo y aplicado a la vivienda social (caso sistema EMMEDUE)”. Proyecto Final de Máster Oficial. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, UPC, Cataluña, BCN, 2014.  
<http://hdl.handle.net/2099.1/23017>

[36] F. D. Orozco. “Módulo De Elasticidad Estático de un Panel de Poliestireno Expandido Revestido de Mortero y Hormigón, Reforzado con Alambre Galvanizado”. Trabajo de Graduación, Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, UCE, Quito, Ec, 2015.  
<http://Www.Dspace.Uce.Ec/Handle/25000/4505>

[37] M. Benavides. “Selección y calificación de sistemas constructivos para tipología de vivienda social flexible”. Trabajo de grado – Pregrado. Departamento de Ingeniería Civil, UNIANDES, Bogotá, D.C., 2013. <http://hdl.handle.net/1992/20134>

[38] I. Mandilaras, I. Atsonios, G. Zannis, and M. Founti. “Thermal performance of a building envelope incorporating WTICS with vacuum insulation panels and EPS”. *Energy and Buildings*, Vol. 85, pp. 654-665, diciembre 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.053>

[39] S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan, and J. Wilson. “Thermal performance assessment of phase change material integrated cementitious composites in buildings: Experimental and numerical approach”. *Applied Energy*, Vol. 207, pp. 654-664, diciembre 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.144>

[40] L. E. Fonseca. “Análisis del comportamiento térmico de las envolventes de las viviendas VIS en la ciudad de Tunja desde el enfoque de las tecnologías limpias”. Proyecto Final de Máster Oficial. Facultad de Diseño, Ucatolica, Bogotá, D.C., 2019.  
<https://hdl.handle.net/10983/23353>

[41] J. R. Molina. “Evaluación bioclimática de una vivienda rural alto andina de la comunidad de San Francisco de Raymina de Ayacucho”. Proyecto Final de Máster Oficial, Facultad de Ciencias, UNI, Lima, PE., 2016.  
[http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/5327/1/molina\\_cj.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/5327/1/molina_cj.pdf)

[42] B. L. Sánchez. “Propuesta para lograr confort térmico en las aulas de la escuela primaria Domingo Becerra Rubio en Tepic, Nayarit”. Proyecto Final de Máster Oficial. Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano, ITESO, San Pedro Tlaquepaque, Jal., 2016.  
<http://hdl.handle.net/11117/3680>

[43] V. N. Cárdenas and P. E. Ochoa. “Comportamiento térmico en envolventes multicapa basados en ladrillo para el medio físico-ambiental de



Cuenca”. Proyecto Final de Licenciatura. Facultad de Diseño, Arquitectura y Arte, UDA, Cuenca, Ec., 2019. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9267>

[44] O. Abdellatif, B. Aour, and H. Messaoud. “The Thermal Transfers of a Habitable Envelope in an Extremely Dry Area and These Effects on Thermal Comfort”. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, Vol. 1, pp. 79-91, junio 2019. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.1.8>

[45] W. Makondo, A. Merabtine, S. Pincemin, A. Gadamer, J. Podlecki, and R. Garcia. “Capteur multifonctions pour l’évaluation du confort thermique dans les bâtiments”, presented at the Congrès Français de Thermique, La Rochelle, FR, 2015. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01804034>

[46] J. Fergus and S. Roaf. “Rethinking thermal comfort”. *Building Research & Information*, Vol. 45, pp. 711-716, marzo 2017. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1301698>

[47] D. Solórzano, R. García, and N. Santillán, “La evaluación del confort térmico al exterior en Mexicali” en *Avances en Investigación Ambiental - Medio Ambiente y Sustentabilidad*. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería, UABC, diciembre 2014. [https://www.researchgate.net/publication/301341157\\_Re\\_ciclaje\\_de\\_materiales\\_de\\_construccion\\_aplicacion\\_en\\_mezclas\\_de\\_concreto\\_hidraulico](https://www.researchgate.net/publication/301341157_Re_ciclaje_de_materiales_de_construccion_aplicacion_en_mezclas_de_concreto_hidraulico)

[48] “Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria” ISO 7730:2005.

[49] G. Bojórquez, R. Romero, C. García and J. Rincón. “Índice De Habitabilidad Térmica Para La Vivienda En Zonas Áridas”. en *Habitabilidad y arquitectura de las culturas del desierto*. Primera edición, pp.172, 2018. <https://elibros.uacj.mx/omp/index.php/publicaciones/catalog/download/127/110/784-1?inline=1>

[50] G. J. Arista, J. Robles, L. Narvaez and L. Peña. “Habitabilidad, accesibilidad y sustentabilidad de la vivienda social en México”. *Hábitat más Diseño*, Vol. 9, no. 17, pp. 9-15, febrero 2017. [https://www.researchgate.net/publication/337632023\\_Habitabilidad\\_accesibilidad\\_y\\_sustentabilidad\\_de\\_la\\_vivienda\\_social\\_en\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/337632023_Habitabilidad_accesibilidad_y_sustentabilidad_de_la_vivienda_social_en_Mexico)

[51] W. Giraldo, J. Czajkowski, and A. Gómez. “Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia”. *Revista de Arquitectura*, Vol. 23, no. 1, pp. 115-124, junio 2021. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7938472>

[52] D. Berkouk. “Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif: Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra”. Proyecto Final de Doctorado Oficial. Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider - Biskra, Algeria, julio 2017. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/2972>

[53] X. Campos, “Confort térmico y habitabilidad de la vivienda en el AA. HH. Edén del Manantial, en las lomas costeras, El Paraíso”. *Investiga Territorios*, no. 4, pp. 107-123. Perú, 2019. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/investigaterritorios/article/view/21455>

[54] B. Zouhir. “Effets des caractéristiques dynamiques de l’enveloppe sur le confort thermique. Cas d’un bâtiment tertiaire dans un climat semi-aride”. Proyecto Final de Máster Oficial. Faculté Des Sciences de la Terre et D’architecture, Université Larbi Ben M’hidi -Oum El-Bouaghi, Argelia, 2020. <http://bib.univ-oeb.dz:8080/jspui/handle/123456789/10234>

[55] “Thermal bridges in building construction - Heat flows and surface temperatures - Detailed calculations” ISO 10211:2017.

[56] I. Asadi, P. Shafigh, Z. Abu-Hassan, and N. Mahyuddin. “Thermal conductivity of concrete - A review”. *Journal of Building Engineering*, Vol. 20, pp. 81-93, noviembre 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.002>

[57] S. Ahmet. “Thermal energy storage characteristics of bentonite-based composite PCMs with enhanced thermal conductivity as novel thermal storage building materials”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 117, pp. 132-141, junio 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.078>

[58] I. Apolonio, L. Cleonice, and A. Santana. “Thermal resistance and conductivity of recycled construction and demolition waste (RCDW) concrete blocks”. *REM - International Engineering Journal*,



Vol. 70, no.2, pp. 167-173, junio 2017.  
<https://doi.org/10.1590/0370-44672015700048>

[59] F. C. Curiel, I. A. Camacho, “Propuesta de materiales termoaislantes para desarrollo de casa-habitación adecuada a cambios climáticos con eficiencia energética”. *Revista de Arquitectura y Diseño*, Vol. 3, no.9, pp. 1-5, septiembre 2019.  
<https://doi.org/10.35429/JAD.2019.9.3.1.5>

[60] S. Iregui, “Evaluación térmica por medio de simulación computacional de las viviendas de interés social modelo, construidas con paneles de fibrocemento mediante el Sistema Celular, por ETERNIT® en 3 climas de Colombia y valoración económica, para su implementación como solución al déficit de vivienda de interés social rural, en el país”. Proyecto Final de Máster Oficial. Departamento de Ingeniería Civil, UNIANDES, Bogotá, D.C., 2020. <http://hdl.handle.net/1992/48614>

[61] Instituto de Salud Pública de Chile, “Protocolo para la Medición de Estrés Térmico”, Vol. 1 Chile, 2013.  
<https://multimedia.3m.com/mws/media/1571805O/protocolo-medicion-estres-termico.pdf>

[62] J. Ley, M. Denigri, O. García, and F. Venegas, Ochoa, M. “Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali. Mexicali, Baja California, México”, *Programa Hábitat*, Instituto de Investigaciones Sociales, UABC, agosto 2011.

<http://dceg.bajacalifornia.gob.mx/Sasip/documentos/archivos/sid10636282967094206693.pdf>

[63] F. Elmjid. “World Population Prospects 2019: Highlights | Multimedia Library - United Nations Department of Economic and Social Affairs. Multimedia Library - United Nations Department of Economic and Social Affairs | Multimedia Library”, 2019.  
<https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-2019-highlights.html>

[64] American Society for Testing and Materials. “Standard Practice for In Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components”. ASTM C 1046-95.

[65] “Ergonomics of the thermal environment – instruments for measuring physical quantities”. ISO 7726: 2012.

[66] V. Jiménez, “Techo verde en vivienda económica en Mérida, Yucatán como estrategia para condiciones de confort térmico”. Proyecto Final de Máster Oficial. Facultad de Arquitectura, UADY, Mérida, YUC, 2013.

Derechos de Autor (c) 2022 Francisco Gibranny Curiel Sánchez, Luisa Paola Murguía Tostado, Gonzalo Bojórquez Morales, Ixchel Astrid Camacho Ixta



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Degradación fotocatalítica de tetraciclina-antibiótico bajo irradiación de luz ultravioleta mediante nanoarquitectura jerárquica de TiO<sub>2</sub> soportada

## *Photocatalytic degradation of tetracycline-antibiotic under ultraviolet light irradiation using supported TiO<sub>2</sub> hierarchical nanoarchitecture*

Juan José Hinostroza Mojarro <sup>1</sup>, Francisco Javier García Picazo <sup>1</sup>, Mirza Mariela Ruiz Ramirez <sup>1</sup>, Karen Melisa Luque López <sup>1</sup>, Balter Trujillo Navarrete <sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/IT de Tijuana/ Tecnológico de Tijuana, Blvd. Alberto Limón Padilla s/n Col. Otay Tecnológico, Tijuana, B.C. 22510, México.

\***Autor de correspondencia:** Dr. Balter Trujillo Navarrete, Centro de Graduados e Investigación en Química. E-mail: [balter.trujillo@tectijuana.edu.mx](mailto:balter.trujillo@tectijuana.edu.mx). ORCID: [0000-0002-0196-1001](https://orcid.org/0000-0002-0196-1001).

Recibido: 22 de Junio del 2021

Aceptado: 7 de Octubre del 2021

Publicado: 14 de Octubre del 2021

**Resumen.** - Se sintetizaron nanoflores de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) fase rutilo similares a crisantemo sobre la superficie de anillos de borosilicato Raschig (BRRs). La nanoarquitectura jerárquica se investigó usando varias técnicas fisicoquímicas: microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopia de energía dispersiva (EED), difracción de rayos-X (DRX), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (IR-TR), espectroscopia de reflectancia difusa (ERD), potencial zeta ( $\zeta$ ). Los TiO<sub>2</sub>-BRR fueron usados como columna empacada en un reactor fotocatalítico, y evaluada su actividad catalítica en la degradación de un antibiótico bacteriostático: tetraciclina (C<sub>22</sub>H<sub>24</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub>). El fotocatalizador eliminó el 91% del contaminante emergente logrando una eficiencia energética del 68% con una carga optimizada de 75 TiO<sub>2</sub>-BRR y un pH de 4 a 25 °C; sin variación significativa en al menos tres ciclos de fotodegradación. Esta información se puede utilizar para el desarrollo de fotocatalizadores soportados de TiO<sub>2</sub> dirigidos a eliminar contaminantes emergentes, ofreciendo una alternativa viable.

**Palabras clave:** Fotocatálisis; TiO<sub>2</sub>; Tetraciclina; Radiación UV; Reactor tipo Batch.

**Abstract.** - Chrysanthemum-like rutile phase titanium oxide (TiO<sub>2</sub>) nanoflowers were synthesized on the surface of Raschig borosilicate rings (BRRs). The hierarchical nanoarchitecture was investigated using several physicochemical techniques: scanning electron microscopy (SEM), energy dispersion spectroscopy (EDS), X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (IR), diffuse reflectance spectroscopy (DRS), zeta potential ( $\zeta$ ). TiO<sub>2</sub>-BRR were used as a packed column in a photocatalytic reactor, and their catalytic activity in the degradation of a bacteriostatic antibiotic: tetracycline (C<sub>22</sub>H<sub>24</sub>N<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) was evaluated. The photocatalyst removed 91% of the emerging contaminant achieving an energy efficiency of 68% with an optimized loading of 75 TiO<sub>2</sub>- BRR and a pH of 4 at 25 °C; without significant variation in at least three photodegradation cycles. This information can be used to develop supported TiO<sub>2</sub> photocatalysts aimed at eliminating emerging contaminants, offering a viable alternative.

**Keywords:** Photocatalysis; TiO<sub>2</sub>; Tetracycline; UV Radiation; Batch type reactor.

## 1. Introducción

El crecimiento acelerado de la población ha incrementado el deterioro y la disponibilidad de agua superficial y/o subterránea, contribuyendo al detrimento de la calidad de vida [1]. Donde las causas principales han sido el desarrollo industrial y el avance tecnológico para satisfacer el consumo masivo de bienes y servicios, generándose cantidades enormes de residuos. Un grupo de contaminantes que han adquirido relevancia son los contaminantes emergentes (CE's). Estos son asociados con el manejo de sustancias químicas utilizadas en la vida cotidiana, generando descargas de agua residual en concentraciones variadas desde ng/L hasta mg/L [2].

Actualmente, los efectos adversos en el ambiente y la salud humana de los CE's son poco conocidos, careciendo de un marco regulatorio confiable [3]. Dentro de los CE's, los fármacos han generado una mayor preocupación debido al aumento de su consumo y su disposición inadecuada. Por ejemplo, la persistencia y toxicidad de los antibióticos en medio acuoso, han causado problemas ambientales graves en las cadenas tróficas, representando una amenaza para la salud pública y los ecosistemas [4-6]. Por ello, se requieren estrategias que permitan su eliminación efectiva para preservar el recurso hídrico y la calidad de vida de la población.

Las técnicas fisicoquímicas convencionales para la eliminación de CE's, estrictamente transfieren los contaminantes de una fase a otra sin destruirlos, p. ej., la adsorción, floculación, ósmosis inversa y extracción [7-8]. En las últimas décadas, los procesos de oxidación avanzada (POAs) muestran resultados prometedores para la eliminación de los CE's, p. ej., la

fotocatálisis heterogénea. En este proceso, la luz incidente interactúa con el fotocatalizador, generando pares de huecos y electrones ( $e^-/h^+$ ) si la energía es igual o superior a la banda prohibida ( $E_g$ ) del semiconductor [9-11].

Dentro de los semiconductores más estudiados como fotocatalizadores sobresale el óxido de titanio ( $TiO_2$ ) [12-13], debido a su excelente estabilidad química y propiedades ópticas es un candidato idóneo para aplicaciones fotoquímicas, además no es tóxico, de bajo costo y fácil de sintetizar [14]. Uno de los nanomateriales actuales más eficientes del proceso fotocatalítico es el polvo de  $TiO_2$  P25 Degussa [15]. El cual presenta en su composición dos fases cristalinas de  $TiO_2$ : anatasa y rutilo (80 y 20% respectivamente), la estructura anatasa presenta la mayor actividad fotocatalítica, mientras que rutilo es la fase más estable [16-17].

El  $TiO_2$  se ha utilizado en forma de partículas pequeñas dispersas para obtener un gran número de sitios activos y superficie activa en los fotorreactores, dificultando su recuperación y reutilización [18-19]. Conjuntamente, la radiación en suspensión es limitada, ya que las partículas cercanas a la fuente de radiación generan sombras que no permiten la iluminación de las más apartadas. Una solución viable a estas limitaciones es la inmovilización de  $TiO_2$  en un soporte [20-21]. Sin embargo, esta opción tecnológica ofrece nuevos desafíos, p. ej., la adhesión al soporte, el tipo de reactor y la distribución de la radiación. Esto permite ofrecer un número mayor de sitios activos para las reacciones de oxidación/reducción igual o mayor a la dispersión de partículas en medio acuoso [22].

En el presente trabajo, se sintetizaron nanoflores de  $\text{TiO}_2$  fase rutilo similares a crisantemo sobre la superficie de BRR's. La nanoarquitectura jerárquica se investigó usando varias técnicas fisicoquímicas. Los  $\text{TiO}_2$ -BRR fueron usados en una columna empacada introducida en un reactor fotocatalítico, estudiando su actividad catalítica en la degradación de un antibiótico bacteriostático: tetraciclina ( $\text{C}_{22}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_8$ , TC).

## 2. Metodología

### 2.1 Síntesis de nanomateriales

Todos los productos químicos, se usaron tal como se recibieron sin purificación adicional y se compraron a Sigma-Aldrich® y Spectrum®: isopropóxido de titanio (IV) ( $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$ , 99.9%, conocido como TTIP), ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ , 37%), etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 98%), ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ , 70%), hidrócloruro de tetraciclina (TC, 95%), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , 30%) y  $\text{TiO}_2$  (IV) fase rutilo ( $\text{TiO}_2$ , 99.9%) como material de referencia. BRR (7 mm x 7 mm x 1 mm) como material de soporte. Todas las soluciones se prepararon usando agua calidad MilliQ® ( $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ , Millipore®).

La síntesis de la nanoestructura de  $\text{TiO}_2$  se realizó por el método hidrotérmico. Se inició con una solución acidulada preparada con la misma proporción de  $\text{H}_2\text{O}/\text{HCl}$  (v/v). Se agregaron 0.8 mL de TTIP a temperatura ambiente, manteniéndose en agitación magnética constante por 10 min. La solución resultante se transfirió a un vial de teflón colocado dentro de una autoclave de acero inoxidable a una temperatura de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$

por 2.5 h en un horno de convección. Previamente, una carga de 20 BRR's tratados fueron colocados en el interior del vial de teflón. Los  $\text{TiO}_2$ -BRR fueron lavados con etanol para eliminar residuos de iones  $\text{Cl}^-$ . Estos fueron secados a  $60^\circ\text{C}$  por 2 h y almacenados a temperatura ambiente para su uso posterior.

### 2.2. Caracterización fisicoquímica

La forma del semiconductor  $\text{TiO}_2$ -BRR fue estudiada por MEB usando un microscopio electrónico (Tescan®, Vega) en modo alta resolución operado a 15 kV. La composición química elemental fue identificada empleando un detector estado sólido de silicio Quantax (Bruker®, Nano GmbH) acoplado al MEB (Tescan®, Vega). La fase cristalina se investigó utilizando un difractor de rayos-X (X'Pert-Pro MPD, Panalytical) operado a 40 kV y 35 mA.

Las propiedades ópticas fueron determinadas usando un espectrofotómetro de UV- VIS (Varian, Cary 100 conc) acoplada con una esfera de integración. La banda prohibida fue determinada usando la teoría de Kubelka-Munk. La carga superficial se midió empleando un analizador de dispersión de luz dinámica (Anton Paar, Litesizer 500), con una fuente de luz dual de 40 mV y un diodo láser con  $\lambda$  de 658 nm. Se empleó un equipo de espectroscopia IR-TF (PerkinElmer®, Spectrum 400) para evidenciar el mecanismo de adsorción del contaminante.

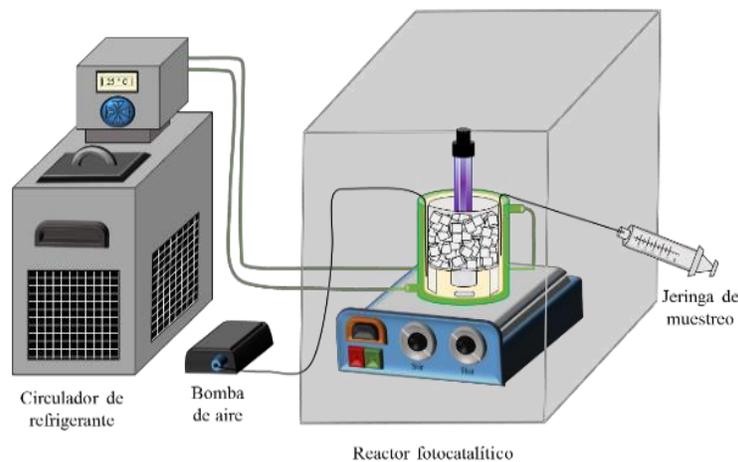
### 2.3. Experimentos de fotocatalisis

El rendimiento de los  $\text{TiO}_2$ -BRR fue evaluado, utilizando un reactor por lotes (**Figura 1**). Se preparó una solución de TC a 20 ppm y un pH de 4.0. Previo a la radiación UV, la suspensión se agitó por

0.5 h en la oscuridad (FO). Inmediatamente, la suspensión se expuso a la radiación UV (lámpara de inmersión de 13 W y  $\lambda$  de 254 nm) (FR) en agitación constante y temperatura constante por 1.5 h. Se tomaron alícuotas de 1.5 mL de la muestra cada  $\frac{1}{4}$  h.

Se evaluaron dos factores con tres niveles en los experimentos fotocatalíticos: (1) el efecto de la carga (i.e., el número de  $\text{TiO}_2$ -BRR:  $x = 50, 75$  y  $100$  unidades); y (2) la adición de  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $x = 0, 7.5$  y  $15$  ppm),

considerando el mejor nivel del factor inicial analizado. Ambos experimentos se realizaron posterior a la FO. Previamente, se analizó la fotólisis de la TC sin el catalizador, únicamente con la radiación UV. Adicional, se realizó un experimento con el catalizador comercial  $\text{TiO}_2$  P25 Degussa (en nanopartículas dispersas), usando una concentración equivalente a la cantidad de catalizador depositado en 50  $\text{TiO}_2$ -BRR (1,135 ppm), el cual fue usado como referencia del desempeño de los catalizadores soportados.

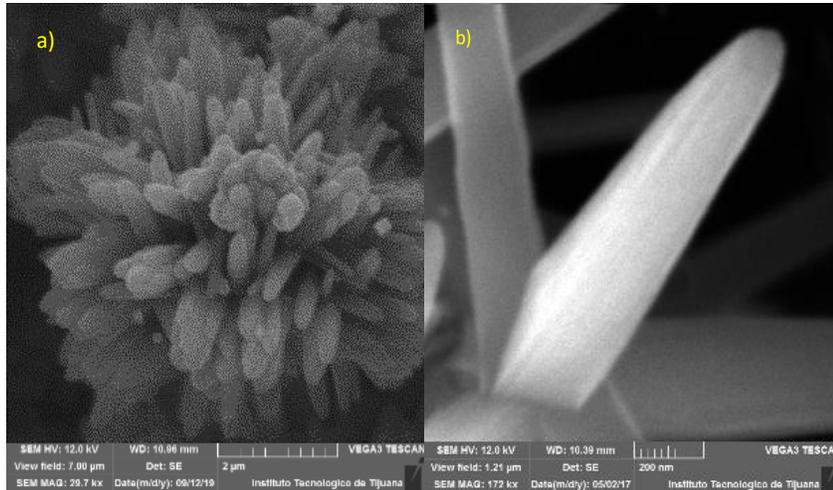


**Figura 1.** Configuración del sistema fotocatalítico del reactor tipo Batch.

### 3. Resultados

**Figura 2** muestra las micrografías de las nanoflores soportadas en la superficie BRR, a diferentes escalas. En detalle, se puede observar el crecimiento de estructuras en la dirección [001] al soporte BRR (**Figura 2a**). Igualmente, la **Figura 2a** muestra nanoflores con un diámetro promedio de  $9 \pm 0.5 \mu\text{m}$ , las cuales

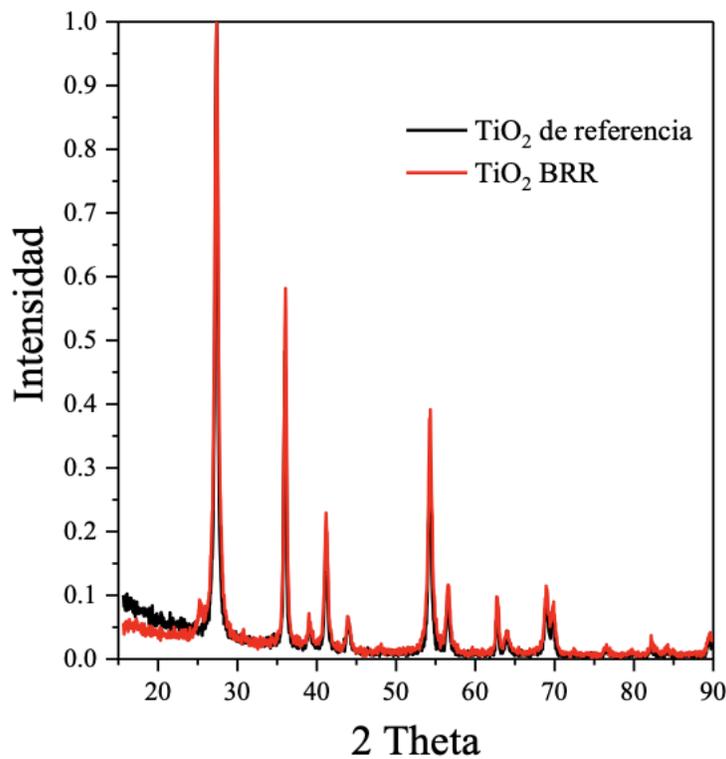
componen las nanovarillas con un espesor de  $743 \pm 20$  nm, previamente reportados por Trujillo *et al.* [23-24]. Donde el área de superficie expuesta de la varilla muestra una estructura de apariencia piramidal (**Figura 2b**). Además, el análisis elemental de  $\text{TiO}_2$ -BRR muestra la presencia Ti y O. El resultado indica que los  $\text{TiO}_2$ -BRR son libres de impurezas de Cl.



**Figura 2.** Micrografías MEB de nanoflores de un fotocatalizador  $\text{TiO}_2$  a diferentes magnificaciones. a)  $\text{TiO}_2$  a 32.8 kx y b)  $\text{TiO}_2$  a 172 kx.

Figura 3 muestra el patrón de difracción de los  $\text{TiO}_2$ -BRR (rojo) y el estándar de  $\text{TiO}_2$  fase rutilo (negro) (archivos JCPDS No. de tarjeta 21-1276) en los valores  $2\theta$  ( $^\circ$ ) de: 27.5, 36.1, 39.2, 41.3, 44.2, 54.3 y 56.6

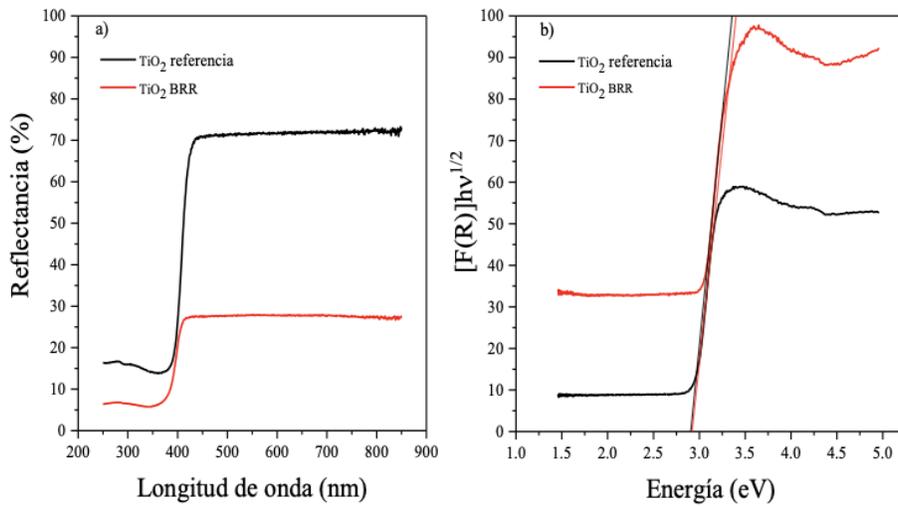
correspondientes a los planos cristalinos (110), (101), (200), (111), (210), (211) y (220), respectivamente [25]. Este resultado permite descartar la presencia de otras fases cristalinas.



**Figura 3.** Difractogramas de rayos-X: en rojo el patrón del  $\text{TiO}_2$ -BRR y en negro como referencia el patrón de rutilo.

Figura 4a muestra los espectros de reflectancia del TiO<sub>2</sub>-BRR (rojo) y el estándar de TiO<sub>2</sub> fase rutilo (negro), como referencia. Se observó una absorción de luz alrededor de los 400 nm, atribuido a las transiciones de los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción del TiO<sub>2</sub>. El cambio en el valor de reflectancia

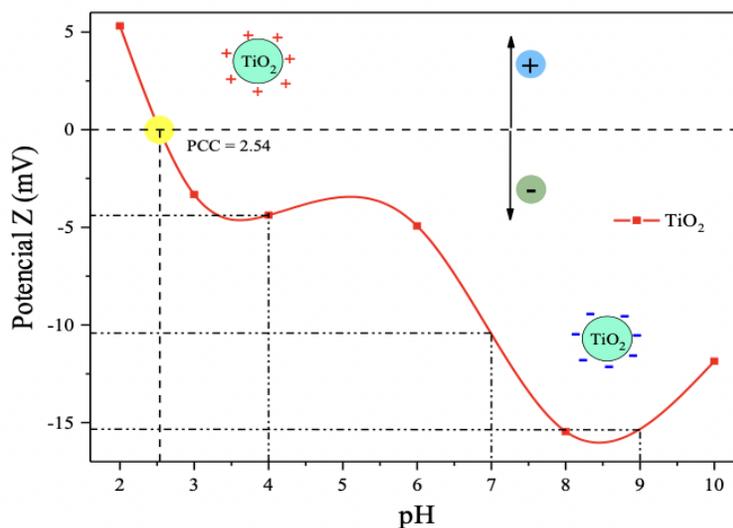
(%) es debido al soporte BRR. La banda prohibida se determinó extrapolando la intersección con el eje de energía (**Fig. 4b**), obteniendo 2.92 eV para el estándar de TiO<sub>2</sub> y 2.90 eV para el TiO<sub>2</sub>-BRR, ambos son valores menores a lo reportado en la literatura (TiO<sub>2</sub> fase rutilo ~3.0 eV) [26-27].



**Figura 4.** Espectro de reflectancia (a), y  $[F(R)]h\nu^{1/2}$  (b) de TiO<sub>2</sub> fase rutilo.

Figura 5 muestra la curva del  $\xi$  en función del pH de los TiO<sub>2</sub>-BRR fase rutilo, tienen un punto isoeléctrico (IEP) a un pH 2.54. Así mismo, se observa que a valores de pH menores del IEP se adquieren cargas

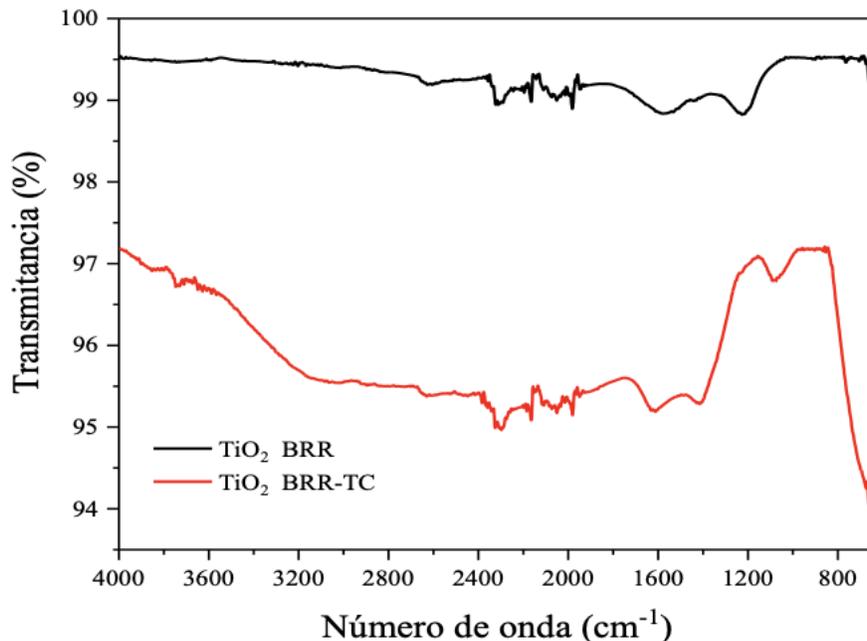
positivas en su superficie, en contraste, a valores de pH mayores al IEP y valores negativos de  $\xi$ , la superficie tiene cargas negativas [28-29].



**Figura 5.** Potencial Zeta y punto isoeléctrico del TiO<sub>2</sub>-BRR fase rutilo.

Figura 6 muestra los espectros IR-TF del TiO<sub>2</sub>-BRR antes y posterior a los experimentos de fotodegradación de la TC. En ambos espectros se observan bandas fuertes en el intervalo desde 1,200 hasta 650 cm<sup>-1</sup>, las cuales están asociadas con los modos vibracionales característicos del TiO<sub>2</sub> fase rutilo. También, se puede observar un pico entre 650 y 800 cm<sup>-1</sup> asignado al estiramiento del enlace O-Ti-O. Los picos observados a 3,400 cm<sup>-1</sup> y 1,600 cm<sup>-1</sup> son atribuidos a la absorción de OH-, correspondientes a los grupos hidroxilo y al H<sub>2</sub>O adsorbido química y físicamente en la superficie de

las nanopartículas del medio circundante [30-31]. En el espectro en rojo, además de los picos del TiO<sub>2</sub>, se observan los asociados a la TC: 1617 cm<sup>-1</sup> relacionado a las vibraciones de estiramiento del anillo bencénico, los picos entre 1457 y 1,400 cm<sup>-1</sup> relacionados a la presencia de aromáticos, 1,036 cm<sup>-1</sup> asociada a las vibraciones de estiramiento del grupo amino y las vibraciones de tensión de los enlaces OH en el intervalo de los 4,000 a 3,500 cm<sup>-1</sup> [32-33]. Los resultados sugieren la capacidad de adsorción de TC en la superficie del TiO<sub>2</sub>-BRR durante la FO.



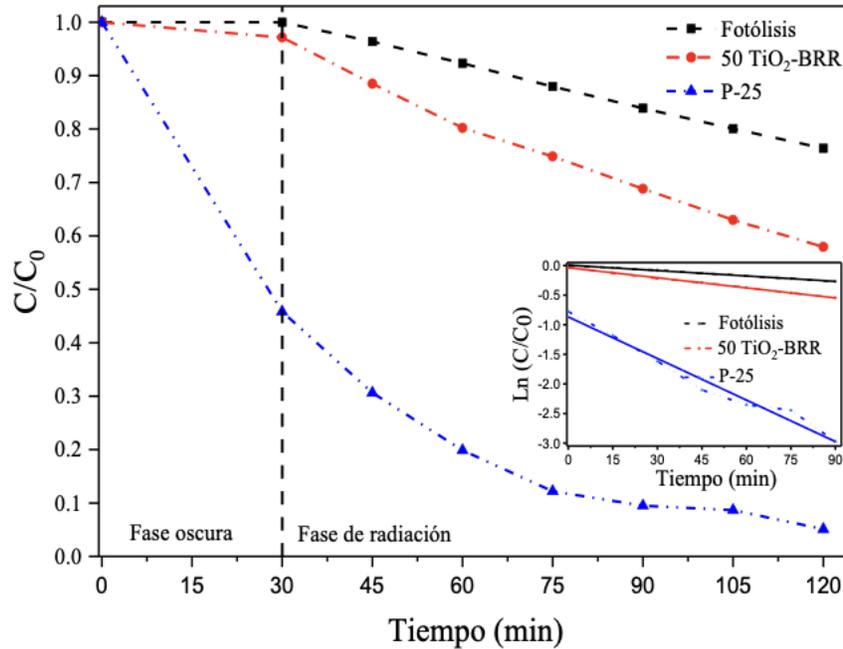
**Figura 6.** Espectros IR-TF del TiO<sub>2</sub>-BRR con (rojo) y sin (negro) presencia de TC.

Figura 7 muestra los resultados obtenidos de los experimentos preliminares en el tiempo de degradación de TC. El inserto muestra las líneas de regresión lineal por mínimos cuadrados, sugiriendo una cinética de primer orden. En la Tabla 1, se enlistan los parámetros de remoción obtenidos, así como el valor de la eficiencia energética (EE) calculada del proceso de fotocatalisis. Los resultados

sugieren que la fotólisis no es una técnica viable para la eliminación de TC y que la presencia del fotocatalizador es necesaria para alcanzar una mayor degradación. De los fotocatalizadores evaluados, TiO<sub>2</sub> P<sub>25</sub> Degussa logró una mayor degradación frente al TiO<sub>2</sub>-BRR. Debido a que TiO<sub>2</sub> P<sub>25</sub> Degussa se presenta en forma de polvo tiene una mayor área de contacto, complicando las mediciones y su

recuperación. Esto se evita utilizando soportes de TiO<sub>2</sub>-BRR ya que no se desprende. Si solo consideramos el resultado de la FR, ambos catalizadores

logran valores similares (40%). Lo que permite considerar al TiO<sub>2</sub>-BRR como un catalizador prometedor.



**Figura 7.** Comportamiento de la degradación de TC mediante fotólisis, TiO<sub>2</sub>.BRR y TiO<sub>2</sub> P-25 (negro, rojo y azul, respectivamente).

**Tabla 1.** Parámetros de la cinética de remoción de TC del fotocatalizador soportado.

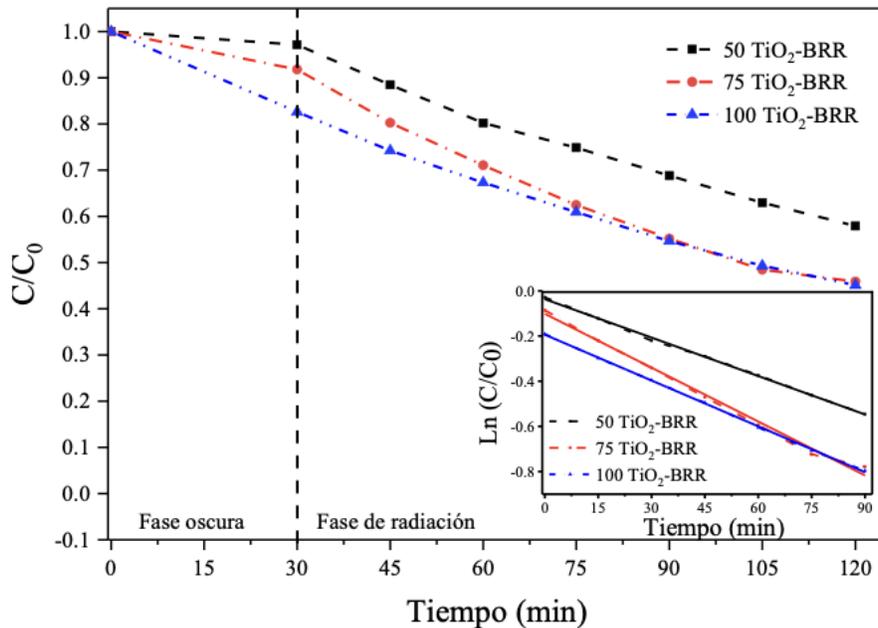
Preliminares	Adsorción	Degradación	<i>k</i>	R <sup>2</sup>	EE
<b>Fotólisis</b>	0%	23.6%	0.0029	99.85%	0.037
<b>50 TIO<sub>2</sub>-BRR</b>	2.87%	42.07%	0.0056	99.84%	0.061
<b>P<sub>25</sub></b>	54.18%	94.88%	0.0225	97.22%	0.247
<b>Evaluación del número de TIO<sub>2</sub>-BRR</b>					
<b>50 TIO<sub>2</sub>-BRR</b>	2.87%	42.07%	0.0056	99.84%	0.061
<b>75 TIO<sub>2</sub>-BRR</b>	8.22%	54.11%	0.0078	99.17%	0.089
<b>100 TIO<sub>2</sub>-BRR</b>	17.42%	54.90%	0.0066	99.95%	0.106
<b>Evaluación de la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>					
<b>0 ppm</b>	8.22%	54.11%	0.0078	99.15%	0.089
<b>7.5 ppm</b>	9.58%	73.82%	0.0132	96.16%	0.154
<b>15 ppm</b>	21.695	90.47%	0.0225	97.32%	0.216

Figura 8 muestra las curvas de remoción para el primer factor: carga de anillos y sus

niveles: 50, 75 y 100 TiO<sub>2</sub>-BRR en ambas fases de la degradación de TC. En el

inserto muestra las líneas de regresión lineal por mínimos cuadrados, todas presentaron una cinética de primer orden. En la Tabla 1 se adicionan los parámetros de remoción obtenidos. A partir de los resultados se observa que el incremento en el número  $\text{TiO}_2\text{-BRR}$  aumenta el número de sitios activos, pero también podría

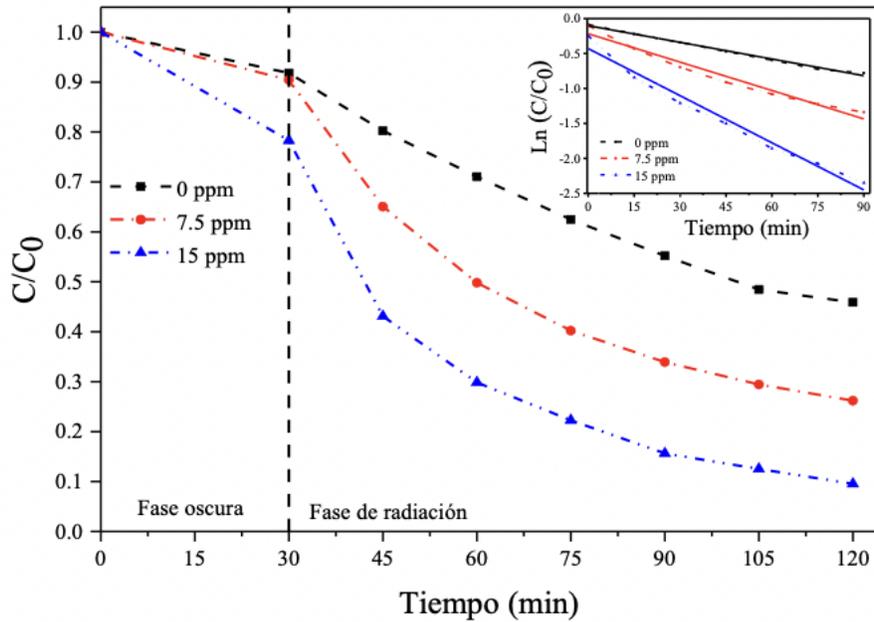
suponer una barrera para la radiación y provocar que el catalizador no sea excitado. Esto se refleja en el valor de degradación ( $\approx 54\%$ ) de 75 y 100  $\text{TiO}_2\text{-BRR}$ . Por lo tanto, se considera a la carga de  $\text{TiO}_2\text{-BRR}$  la idónea para los siguientes experimentos, reduciendo el gasto de recursos.



**Figura 8.** Comportamiento de la degradación de TC mediante la carga de 50, 75 y 100  $\text{TiO}_2\text{-BRR}$  (negro, rojo y azul, respectivamente).

Figura 9 muestra las curvas de remoción para el segundo factor: la adición de  $\text{H}_2\text{O}_2$  y sus niveles: 0, 7.5 y 15 ppm en ambas fases de la degradación de TC. En el inserto, se muestra el comportamiento cinético para los tres niveles, sugiriendo una cinética de primer orden. En la Tabla 1 se enlistan los parámetros de remoción obtenidos. En la degradación de TC se observó que al aumentar la concentración de  $\text{H}_2\text{O}_2$  se logran porcentajes mayores de

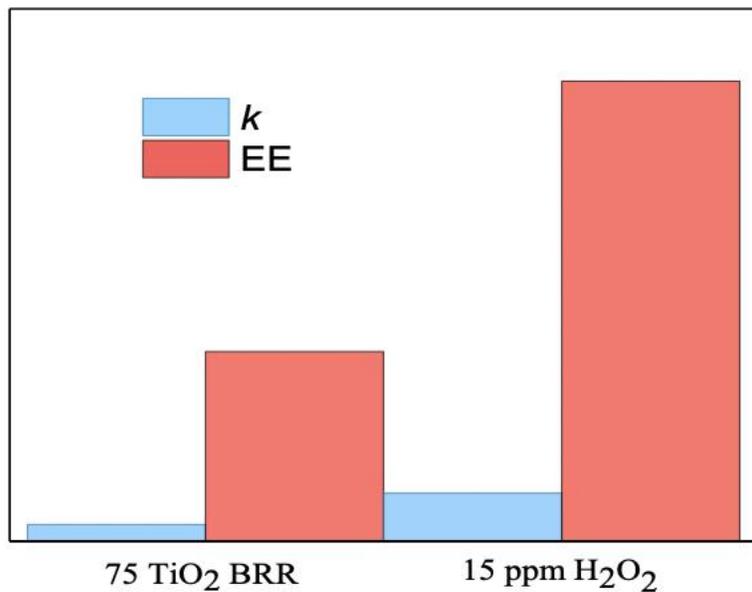
degradación y un aumento de la constante de velocidad ( $k$ ). Debido a una mayor disponibilidad de radicales hidroxilos, mientras la TC se degrada en la superficie del catalizador, el  $\text{H}_2\text{O}_2$  lo hace en el seno de la solución. Pero debido a que el tiempo de vida del  $\text{H}_2\text{O}_2$  es corto, es importante considerar la combinación del catalizador y el  $\text{H}_2\text{O}_2$  para mejorar el sistema fotocatalítico, logrando un mayor porcentaje de degradación de TC.



**Figura 9.** Comportamiento de la degradación de TC mediante la adición de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> en concentraciones de 0 ppm, 7.5 ppm y 15 ppm (negro, rojo y azul, respectivamente).

Figura 10 muestra un gráfico comparativo de  $k$  y su correspondiente EE para los valores óptimos de cada factor. La adición de 15 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> muestra el mejor desempeño. Mientras que el proceso de 75

TiO<sub>2</sub>-BRR presentó la EE más bajo de los dos factores, coincidiendo el orden de EE con los porcentajes de degradación para cada uno de los factores, como se muestra en la Tabla 1.



**Figura 10.** Comparativo de la  $k$  y la EE de la degradación de TC para 75 TiO<sub>2</sub>-BRR y la adición de 15 ppm H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo, se logró la adhesión de nanoflores de TiO<sub>2</sub> fase rutilo similares a crisantemo en un soporte de borosilicato. La caracterización fisicoquímica indicó nanoestructura idéntica a las obtenidas en dispersión, reproduciendo las condiciones de síntesis sobre la superficie del soporte. El desempeño del fotocatalizador inmovilizado fue similar al de partículas libre para la remoción de TC. La adición de una cantidad mínima de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al sistema permitió lograr un resultado similar a P<sub>25</sub> Degussa. A partir de los resultados reportados se puede indicar que el desarrollo de fotocatalizadores inmovilizados de TiO<sub>2</sub> son una alternativa viable para eliminar contaminantes emergentes.

#### 5. Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento para realizar el proyecto No. 10089.21-P.

#### 6. - Reconocimiento de autoría

*Juan José Hinostroza Mojarro*: Redacción del borrador original; metodología; análisis e investigación; validación; revisión y edición; *Francisco Javier García Picazo*: metodología, análisis e investigación; *Mirza Mariela Ruiz Ramírez*: metodología, análisis e investigación; *Karen Melisa Luque López*: metodología; *Balter Trujillo Navarrete*: Conceptualización y metodología; análisis e investigación; escritura; revisión y edición; supervisión; y administración de proyecto.

#### Referencias

- [1] T. Larsen, W. Gujer, "The Concept of Sustainable Urban Water Management", *Water Science and Technology*. Elsevier, vol. 35, no. 9, pp. 3-10, 1997. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0326>
- [2] J. A. Jaimes Urbina y J. A. Vera Solano, "Los contaminantes emergentes de las aguas residuales de la industria farmacéutica y su tratamiento por medio de la ozonización", *Inf. tec.*, vol. 84, no. 2, pp. 249-263, 2020. <https://doi.org/10.23850/22565035.2305>
- [3] A. Pal, Y. He, M. Jekel, M. Reinhard, K. Gin, "Emerging Contaminants of Public Health Significance as Water Quality Indicator Compounds in the Urban Water Cycle", *Environment International*. Elsevier, vol. 71, pp. 46-62, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.05.025>
- [4] R. Ata, G. Yıldız Töre, "Characterization and Removal of Antibiotic Residues by NFC- Doped Photocatalytic Oxidation from Domestic and Industrial Secondary Treated Wastewaters in Meric-Ergene Basin and Reuse Assessment for Irrigation", *J. Environ. Manage.* Elsevier, vol. 233, pp. 673-680, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.095>
- [5] Q. Li, R. Jia, J. Shao, Y. He. "Photocatalytic Degradation of Amoxicillin via TiO<sub>2</sub> Nanoparticle Coupling with a Novel Submerged Porous Ceramic Membrane Reactor", *J. Clean. Prod.* Elsevier, vol. 209, 755-761, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.183>
- [6] J. M. Stokes, A.J. Lopatkin, M.A. Lobritz, J.J. Collins. "Bacterial Metabolism and Antibiotic Efficacy". *Cell Metab.* Elsevier, vol. 30, no. 2, pp. 251-259, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2019.06.009>
- [7] Abu, H. Muhammad, M. Ismail, N, "A Review of Biological Drinking Water Treatment Technologies for Contaminants Removal from Polluted Water Resources". *Journal of Water Process Engineering*. Elsevier, 33, 101035, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101035>
- [8] H. Rajput, V. K. Sangal, A. Dhir. "Synthesis of Highly Stable and Efficient Ag Loaded GO/TiO<sub>2</sub> Nanotube Electrodes for the Photoelectrocatalytic

Degradation of Pentachlorophenol". *J. Electroanal. Chem.* Elsevier, vol. 814, pp. 118-126, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.02.053>

[9] Kumar, J. Bansal, A. "CFD Simulations of Immobilized-Titanium Dioxide Based Annular Photocatalytic Reactor: Model Development and Experimental Validation". *Indian Journal of Chemical Technology*. NISCAIR-CSIR, vol. 22, pp. 95-104, 2015.

[10] D. Vaya, P. K. Surolia, "Semiconductor based photocatalytic degradation of pesticides: An overview", *Environmental Technology & Innovation*. Elsevier, vol. 20, 101128, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101128>

[11] M. Tahir, S. Tasleem, B. Tahir, "Recent development in band engineering of binary semiconductor materials for solar driven photocatalytic hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier, vol. 45, no. 32, pp. 15985-16038, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.071>

[12] R. Ameta, M. S. Solanki, S. Benjamin, S. C. Ameta. Photocatalysis. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment*; Elsevier, pp. 135-175, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>

[13] C. Belver, J. Bedía, A. Gómez-Avilés, M. Peñas-Garzón, J. J. Rodríguez. "Semiconductor Photocatalysis for Water Purification", In *Nanoscale Materials in Water Purification*. Elsevier, pp 581-651. 2019 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813926-4.00028-8>

[14] Alev, O. Şennik, E. Kılınc, N. Öztürk, Z. "Gas Sensor Application of Hydrothermally Growth TiO<sub>2</sub> Nanorods", *Procedia Engineering*. Elsevier, vol. 120, pp. 1162-1165, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.747>

[15] M. Hantusch, V. Bessergenev, M. C. Mateus, M. Knupfer, E. Burkel. "Electronic properties of photocatalytic improved Degussa P25 titanium dioxide powder", *Catalysis Today*. Elsevier, vol. 307, pp. 111-118, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.11.005>

[16] D. A Cruz Rodriguez. Relación Entre Las Propiedades Texturales de Los Recubrimientos de TiO<sub>2</sub> Con La Degradación Fotocatalitica de Ácidos Grasos. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.:

Chihuahua, 2016.

[17] V. G. Bessergenev, M. C. Mateus, A. M. B. do Rego, M. Hantusch, E. Burkel, "An improvement of photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub> Degussa P25 powder", *Applied Catalysis A: General*. Elsevier, vol. 500, pp. 40-50, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2015.05.002>

[18] V. Parvulescu, M. Ciobanu, G. Petcu, "Handbook of Smart Photocatalytic Materials". Elsevier, Estados Unidos de America, 1er edición 2020.

[19] F. de Brites, A. Polo, A. Benedetti, M. Leão, V. Slusarski-Santana, N. Fernandes, "Evaluation of Photocatalytic Activities of Supported Catalysts on NaX Zeolite or Activated Charcoal", *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier, vol. 263, pp. 61-66, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.061>

[20] Sun, Z. Bai, C. Zheng, S. Yang, X. Frost, R. "A Comparative Study of Different Porous Amorphous Silica Minerals Supported TiO<sub>2</sub> Catalysts". *Applied Catalysis A: General*. Elsevier, 458, 103-110, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2013.03.035>

[21] B. Srikanth, R. Goutham, R. Badri Narayan, A. Ramprasath, K. P. Gopinath, A. R. Sankaranarayanan, "Recent advancements in supporting materials for immobilised photocatalytic applications in waste water treatment", *Journal of Environmental Management*. Elsevier, vol. 200, pp. 60-78. 2017 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.063>

[22] K. P. Sundar, S. Kanmani, "Progression of Photocatalytic Reactors and It's Comparison: A Review", *Chem. Eng. Res. Des.* Elsevier, vol.154, pp.135-150, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.11.035>

[23] C. Silva, B. Trujillo, R. M.Felix, E. Reynoso, M. Ruiz, "Study of the structure and lattice distortion on the sensing properties of hierarchical rutile TiO<sub>2</sub> nanoarchitectures", *Functional Materials Letters*. World Scientific, vol. 11, no. 4, 2018. <https://doi.org/10.1142/S179360471850073X>

[24] M.M. Ruiz, C. Silva, J.J. Hinostroza, Y.Y. Rivera, P. Valle, B. Trujillo, "Electrochemical sensor for determination of nitrobenzene in aqueous solution based on nanostructures of TiO<sub>2</sub>/GO", *Fuel*. Elsevier, vol. 283, no. 119326, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119326>

[25] S. Ikram, J. Jacob, K. Mehboob, K. Mahmood, A. Ashfaq, A. Ali, U. Rehman, "A novel approach to simultaneously enhance the Seebeck coefficient and electrical conductivity in rutile phase of TiO<sub>2</sub> nanostructures", *Arabian Journal of Chemistry*. Elsevier, vol. 13, no. 8, pp. 6724-6729, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.06.026>

[26] A. C. Nkele, U. K. Chime, L. Asogwa, A. C. Nwanya, U. Nwankwo, K. Ukoba, F. I. Ezema, "A Study on Titanium Dioxide Nanoparticles Synthesized from Titanium Isopropoxide Under SILAR-Induced Gel Method: Transition from Anatase to Rutile Structure", *Inorganic Chemistry Communications*. Elsevier, vol. 112, no. 107705, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2019.107705>

[27] J. Singh, S. Sharma, S. Sharma, R. C Singh, "Effect of tungsten doping on structural and optical properties of rutile TiO<sub>2</sub> and band gap narrowing", *Optik*. Elsevier, vol. 182, pp. 538-547, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.01.070>

[28] J. M Calatayud, "Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de TiO<sub>2</sub> y ZrO<sub>2</sub> Dopadas Con Cationes de Metales de Transición. Aplicaciones Como Nanopigmentos y En Fotocatálisis", *Universitat de València: Valencia*, 2017.

[29] S. Estrada-Flores, A Martínez-Luévanos, L. A.

García-Cerda, C. M. Pérez-Berumen, T. E. Flores-Guía, E. Aguilera-González, "Síntesis de Partículas Mesoporosas de TiO<sub>2</sub> y Estudio Cinético de La Fotodegradación de Azul de Metileno", *Rev. Int. Investig. e Innovación Tecnológica*, vol. 7, no. 42, pp. 1-13, 2020.

[30] H. Rajput, V. K. Sangal, A. Dhir, "Synthesis of highly stable and efficient Ag loaded GO/TiO<sub>2</sub> nanotube electrodes for the photoelectrocatalytic degradation of pentachlorophenol", *Journal of Electroanalytical Chemistry*. Elsevier, vol. 814, pp. 118-126, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.02.053>

[31] S. B. Wategaonkar, R. P. Pawar, V. G. Parale, D. P. Nade, B. M. Sargar, R. K. Mane, single step hydrothermal route and its characterization", *Materials Today: Proceedings*. Elsevier, vol. 23, pp. 444-451, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.065>

[32] T. Wan, S. Lu, W. Cheng, J. Ren, M. Wang, B. Hu, Y. Sun, "A spectroscopic and theoretical investigation of interaction mechanisms of tetracycline and polystyrene nanospheres Pollution. Elsevier, vol. 249, pp. 398-405, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.049>

[33] A. A. Mohammed, S. L. Kareem, "Adsorption of tetracycline from wastewater by using Pistachio shell coated with ZnO nanoparticles: Equilibrium, kinetic and isotherm studies", *Alexandria Engineering Journal*. Elsevier, vol. 58, no. 3, pp. 917-928, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.08.006>

Derechos de Autor (c) 2022 Juan José Hinojosa Mojarro, Francisco Javier García Picazo, Mirza Mariela Ruiz Ramírez, Karen Melisa Luque López, Balter Trujillo Navarrete



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Evaluation of particle board production from cotton gin waste and urea-formaldehyde resin

## *Evaluación de la producción de tableros de partículas a partir de residuos de desmotadora de algodón y resina de urea-formaldehído*

Agustina Trevisan <sup>1</sup>, Luciano Gabriel Massons <sup>1</sup>, Florencia Benítez <sup>1</sup>, María Fernanda Carrasco <sup>1</sup>, Rubén Marcos Grether <sup>1</sup>, Ariel Anselmo González <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Lavaisse 610, S3004EWB, Santa Fe, Argentina

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Departamento de Ingeniería Civil, Lavaisse 610, S3004EWB, Santa Fe, Argentina

**Corresponding author:** Luciano Gabriel Massons, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Lavaisse 610, S3004EWB, Santa Fe, Argentina. E-mail: [lmassons@frsf.utn.edu.ar](mailto:lmassons@frsf.utn.edu.ar). ORCID: 0000-0002-5584-5903.

**Recibido:** 18 de Julio del 2021

**Aceptado:** 11 de Octubre del 2021

**Publicado:** 20 de Octubre del 2021

**Abstract.** - *The objective of this study is the evaluation of the feasibility of producing particleboard for general use using cotton gin waste generated in Argentina and urea formaldehyde resin. The chemical composition and size distribution of particles of the ginning residue as well as mechanical and physical properties of the particleboards obtained were investigated. The Density and flexural strength of particleboards produced by varying levels of urea-formaldehyde resin between 8.3 and 19.3% (solid to solid ratio) were evaluated. The effect of incorporating jute reinforcement on the mechanical properties of these boards was also analyzed. Particleboards with densities between 530 and 700 kg/m<sup>3</sup> and variable flexural strength between 0.30 and 5.85 MPa were obtained, allowing the minimum levels required for low-density boards to be reached. Strength values achieved allow this particleboard to be used in applications without structural requirements, such as door core or insulation.*

**Keywords:** Cotton gin residue; Urea-formaldehyde resin; Particleboards; Jute.

**Resumen.** - *El objetivo de este estudio es la evaluación de la factibilidad de producir tableros de partículas para uso general utilizando residuos de desmotadora de algodón generados en Argentina y resina de urea formaldehído. Se investigó la composición química y distribución de tamaño de las partículas del residuo del desmotado, así como las propiedades mecánicas y físicas de los tableros de partículas obtenidos. Se evaluó la densidad y la resistencia a la flexión de los tableros de partículas producidos por niveles variables de resina de urea-formaldehído entre el 8,3 y el 19,3% (proporción de sólido a sólido). También se analizó el efecto de incorporar refuerzo de yute sobre las propiedades mecánicas de estos tableros. Se obtuvieron tableros de partículas con densidades entre 530 y 700 kg / m<sup>3</sup> y resistencia a la flexión variable entre 0,30 y 5,85 MPa, lo que permitió alcanzar los niveles mínimos requeridos para los tableros de baja densidad. Los valores de resistencia alcanzados permiten que este tablero de partículas se utilice en aplicaciones sin requisitos estructurales, como el núcleo de la puerta o el aislamiento.*

**Palabras clave:** Residuos de desmotadora de algodón; Resina de urea-formaldehído; Tableros de partículas; Yute.

## 1. Introduction

Cotton production in the north of Santa Fe province, is an important productive activity, as in Chaco, Formosa, Santiago del Estero and Corrientes, showing high geographical concentration. This productive activity presents some troubles that should be addressed.

In previous harvests, about 1,000,000 tons of bulk cotton were obtained, leaving behind more than 300,000 tons (approximately 1,195,000 cubic meters) of cotton gin waste (> 30 %), consisting of fibril, carpels, and other components, without any intended destination [1].

In recent decades the use of mechanical harvesting has become widespread, notably improving the profitability of the crop, but producing a greater amount of ginning residue that must be disposed of effectively, generating drawbacks and extraordinary costs to the ginning sector [2].

This waste, which is usually stockpiled in the open air, result in an exceptional habitat for vermin and rodents and, likewise, they are self-igniting, thus representing a danger to nearby communities.

Another characteristic of the ginning sector that is important to bear in mind is that it carries out intensive activities for approximately 100 days a year, in correspondence with harvest-ginning campaigns, and then dedicates itself to maintenance activities or other related activities (processing of seeds) with minimal staff requirements. This situation results in a reduction of personnel or a reduction in working hours (and therefore remuneration) of the local population. One aspect of cotton production that threatens the implementation of complex technologies in order to reuse ginning waste is the variability of the interannual production, registering in the last decades campaigns that oscillate between 386,676 and 1,032,545 t of raw cotton, according to data from the Ministry of Agroindustry and CCIA [2].

Currently attempts are being made to use ginning residues as livestock feed, although it is very limited because of the low digestibility of the material, which barely exceeds 20 %, a very low value compared to other feed options [3-4].

Another use is composting, which appears to be the most viable solution, although cotton gin waste diffusion as a material to make compost is somewhat limited and of low profitability [5-6].

Unfortunately, in most cases these ginning residues are burned. Because most of the ginning plants are located within the urban zones, they originate serious pollution problems, with any solution proposals, and which cause discomfort among the residents of the surrounding neighborhoods, who fear suffering some kind of illness or respiratory affection. Hence, risks associated with the burning of residues that may be contaminated with toxic agrochemicals must be considered [7-10].

Finally, although other possible uses such as hydrolysis or pyrolysis are identified, the high added value of the obtainable products is offset by the excessive cost of installations and operation, and the requirement for qualified labor.

In this scenario, the possibility of developing innovative construction elements with cotton gin waste could help in addressing both environmental and social problems in this agro-industrial sector, as well as offering new materials for application in building or simple furniture manufacturing. In this direction, possible applications are envisioned in order to improve the habitability conditions of homes, since in the northern region of Santa Fe province, there is a high percentage of constructions with serious problems in their vertical and horizontal enclosures [11].

The production of panels based on lignocellulosic residues constitutes a dry construction technology with thermoacoustic insulating

characteristics and good resistance to degradation. Numerous studies have been detected that propose the recovery of waste and its application in particleboards, some of them proposing these technologies as substitutes for wood particleboards [12-24]. Some research carried out in our country arouses special interest, aimed at the production of panels based on corn marl [12], used as lightweight, insulating and easy-to-install ceiling plates. This type of element could become a mechanical barrier in order to prevent the attack by the kissing bug and thus reduce the appearance of Chagas disease.

Dr. Mariana Gatani has carried out research work in which peanut shells are used for the development of particleboards intended for the construction of enclosures and ceilings and furniture [14-16].

In the present paper, some research advances are presented on characteristics of the cotton gin waste, its conditioning, the possibility of obtaining particleboards, the properties achieved, and the future perspectives identified in this investigation.

## 2. Materials and methods

Cotton gin waste used for the particleboards elaboration was obtained from stockpiles of a ginning plant located in Santa Fe province (Argentina). This residue is composed of cotton fiber that cannot be separated in the industrial process, carpels, branches of different sizes, leaves, and dust that is incorporated during collection (Fig. 3).

These residues were chipped in a hammermill (LOYTO N° 2), equipped with a 16 mm sieve and 8 floating steel hammers. The granulometric

characterization of the ground and unmilled ginning residue was carried out, after manual homogenization of the samples and reduction of their size by quartering. Sieves employed were: N° ½" (12.5 mm), N° 3/8" (9.5 mm), N° 4 (4.75mm), N° 8 (2.36 mm), N° 16 (1.18 mm) and N° 30 (0.6 mm), determining the weight of the material retained in each one of them.

pH determinations [25], solubility in 1% NaOH (TAPPI 212 om-02), solubility in cold and hot water (TAPPI 207 om-93) were performed on cotton gin waste. Results of solubility in hot and cold water were corrected according to the ash content. The average of two measurements was reported.

After milling process, all the chips were dried, at oven at  $105 \pm 2$  °C, to 3 % moisture content from a natural moisture level of 16 %.

Subsequently, the ginning residue was manually mixed with the urea formaldehyde resin, with a minimum solid content of 65 %, density of 1.26 g/cm<sup>3</sup>, gelation time at 100 °C of 6 min and viscosity at 25 °C of 950 cps. Water was added to the resin to achieve solid content of 55 % and a 5 % saturated ammonium sulphate solution was used as a catalyst.

Resin content used for particleboard manufacturing, varied from 8.3 % to 19.3 % (based on oven dry weight of the particles).

After mixture homogenization, it was placed in a mold, pressed until reaching a maximum pressure of 4.75 MPa and then maintained at 70 °C for 30 minutes, obtaining boards with nominal dimensions of 170 x 170 x 10 mm (Figure 1).

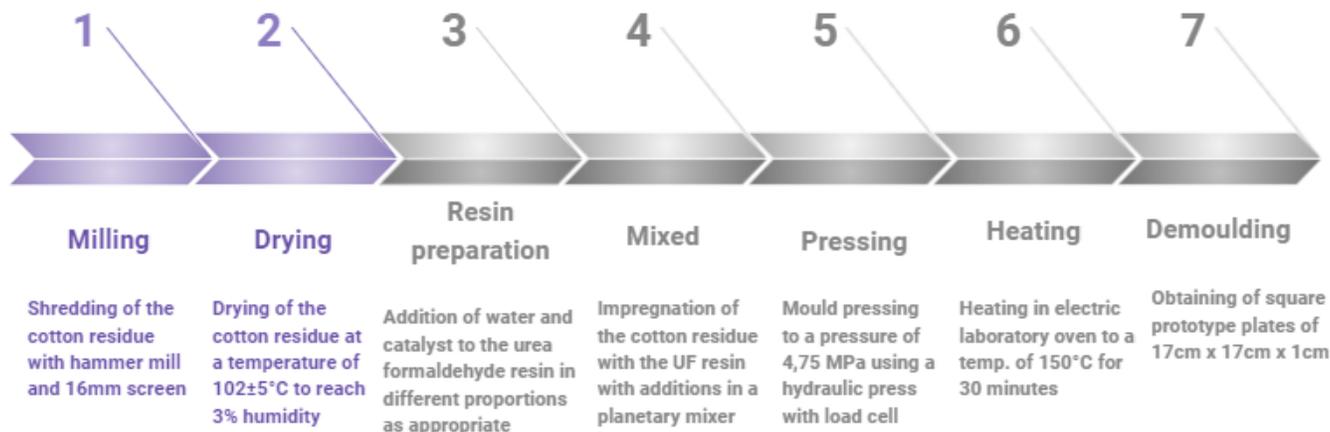


Figure 1. Molding scheme

The use of bidirectional jute fabric with a surface density of  $252 \text{ g/m}^2$  was evaluated as a reinforcement (Figure 2). It was impregnated with the same proportion of resin as the ginning residue [20].

On particleboards obtained, determinations of density, bending strength and modulus of elasticity were made.

Density was determined according to IRAM 9705 procedure.

Bending strength was carried out according to the guidelines of IRAM 9706, maintaining a specimen length of 160 mm. Molded samples were cut into 4 specimens of nominal dimensions  $160 \times 40 \times 10 \text{ mm}$ . These specimens were conditioned for 48 to 72 hours prior to the test, in a controlled environment at  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  and  $65 \pm 5\%$  relative humidity. The load was applied in the center of the span (140 mm), at a constant deformation rate of 12 mm/min, until the failure of the specimen was verified.



Figure 2. Bidirectional jute fabric

### 3. Results and discussion

Natural cotton gin waste has concave shapes, which makes impossible to achieve an adequate adhesion between particles. For this reason, it was decided to grind this material, achieving greater uniformity in particle size and improving its morphological characteristics.

Table 1 shows the amount of residue particles retained on each sieve, both for the residue in its natural condition and for the chipped material. It is noted that the fraction greater than 4.75 mm is drastically reduced by grinding, corresponding to 95.85 % for the natural residue, while in the chipped material it reaches 54.8 %.

For chipped residue the amount of particles smaller than 600 µm is 8.86 %, and it is constituted by very fine remains of particles and dust, which must be discarded in order to manufacture particleboards due to its great adhesive demand.

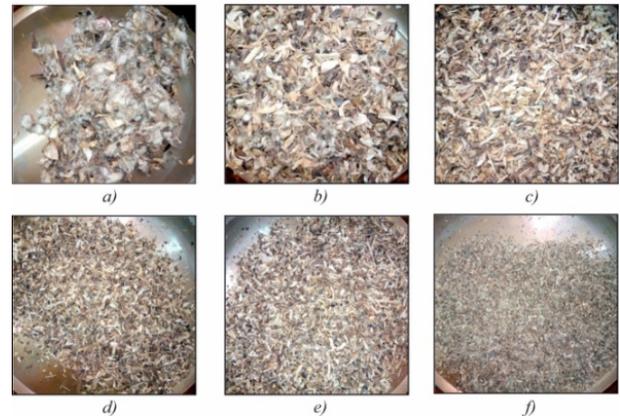
**Table 1.** Particle size distribution in cotton gin waste

Sieve		Individual retained (%)	
No.	Sieve size (mm)	Natural waste	Chipped waste
1/2"	12.50	----	24.28
3/8"	9.50	----	8.86
4	4.75	95.85	21.66
8	2.36	----	17.05
16	1.18	1.93	13.16
30	0.60	----	6.13
100	0.15	1.04	----
Bottom		1.18	8.86

It can be appreciated a diversity of particle sizes between 12.6 and 0.6 mm in the ground material, since there are significant percentages retained in each sieve. Consequently, length to thickness ratio varies from 3 to 18. From the photographs of each fraction retained on sieves (Figure 3), different particle morphologies can be observed, the most irregular ones corresponding to the larger sizes and the flatter ones to the smaller sizes. Brumbaugh [31] studied the effect of wood flake size and indicated MOR values increased as the length to thickness ratio increased to 250 and remained constant at higher ratios, significantly different from cotton gin particles used in this investigation.

The results of solubility in 1% NaOH, in cold and hot water of the residue are shown in table 2. pH of the residue resulted equals to 5 for cold water determination and 6,4 for hot water determination. Cold water procedure constitutes a measure of components such as tannins, gums, sugars and coloring materials. Hot water procedure also measures the starch, while the NaOH extractions show the presence of low molecular weight

carbohydrates, mainly hemicelluloses present in the sample.



**Figure 3.** Morphology of chipped cotton gin waste retained in sieves: a) retained over 1/2"; b) passing 1/2", ret. 3/8"; c) passing 3/8", ret. 4.75 mm; d) passing 4.75 mm, ret. 2.36 mm; e) passing 2.36 mm, ret. 1.18mm; f) passing 1.18 mm, ret. 0.6 mm.

The comparison of the soluble components presents in the ginning residue, with respect to other materials such as hard and soft woods, cereal stubble, and shells from other crops, such as peanut and hazelnut shells, indicates values higher than most of the species used in other investigations, with the sole exception of hazelnut shells [27-29]. In previous works [32] it was found that by soaking ginning residue under ambient conditions for 48 hours, it was possible to reduce soluble components content at the same time that residue wettability was improved. This improvement cotton carpels also verified by HakkıAlma et al. [30] as boards made with cotton carpels soaked for 2 weeks under ambient conditions showed less thickness swelling and higher levels of bending strength. These changes in the wettability of the residue could explain the poor adhesion between the urea formaldehyde resin and the residue in its natural state. At the same time, inequity of pH of residue and resin can hinder good bonding between them and hardening of resin [34-35]. Level of pH of cotton gin waste is 5 to 6.4, and the resin presents a pH value of 8, resulting relatively different.

**Table 2.** Cotton gin waste chemical analysis.

Chemical component	Percent
1 % NaOH solubility	46.0
Hot water solubility	16.1
Cold water solubility	11.9
pH in cold water	5.0
pH in hot water	6.4

Table 3 shows the average values of density, bending strength (MOR) and modulus of elasticity (MOE) obtained for the particleboards made of cotton gin waste. Samples produced without reinforcement are called N and those with incorporation of bidirectional jute sheet on each face are identified as N + Y. Bidirectional jute sheets bonded to the particleboard covered the total surface of each of the 170 x 170 mm faces (Figure 4).



**Figure 4.** Panels obtained in the mouldings: (a) without incorporation of reinforcement; (b) with incorporation of bidirectional jute sheeting

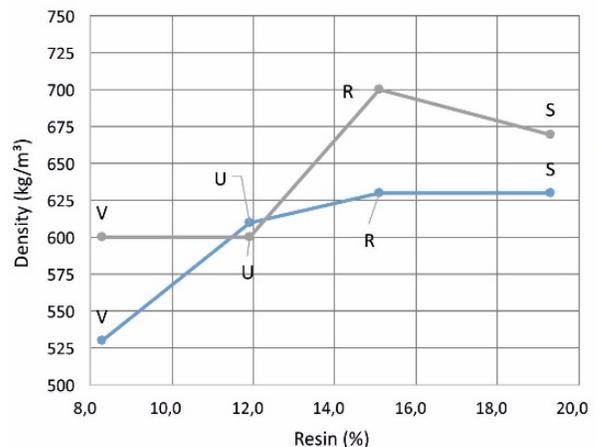
**Table 3.** Physical and mechanical properties of cotton gin waste particleboards.

Sample	Pressure (MPa)	Adhesive (%)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	MOR (MPa)	MOE (MPa)
V-N	4.75	8.3	530	0.30	15
V-N+Y	4.75	8.3	600	1.04	62
U-N	4.75	11.9	610	1.62	138
U-N+Y	4.75	11.9	600	3.06	160
R-N	4.75	15.1	630	3.15	269
R-N+Y	4.75	15.1	700	5.53	358
S-N	4.75	19.3	630	3.05	324
S-N+Y	4.75	19.3	670	5.85	390

Particleboard density varies between 0.53 g/cm<sup>3</sup> to 0.63 g/cm<sup>3</sup> for those that do not incorporate reinforcement (N) and between 0.60 g/cm<sup>3</sup> to 0.70 g/cm<sup>3</sup> for the N + Y samples. In figure 5 it can be seen that as the resin content increases, there is an increase in density. This behavior is similar for all particleboards, regardless of the presence of reinforcement (Fig. 5) up to a content of 15.1 %.

Density values obtained place unreinforced particleboards in the low density (LD) classification according to the ANSI A208.1 standard [33], which establishes an upper limit of 640 kg/m<sup>3</sup>. At the same time, the incorporation of bidirectional jute reinforcement increases the density values, reaching, for the highest percentage of resin, the classification of medium density (M) according to ANSI A208.1 (640 to 800 kg/m<sup>3</sup>) [33].

Commercial particleboards available in the area present density values between 610 and 690 kg/m<sup>3</sup>, which are similar to those corresponding to the experimental boards obtained. For these commercial boards bending strength is between 8.5 to 19 MPa, modulus of elasticity between 1200 to 2300 MPa and the adhesive consumption generally varies from 2.5 to 10 % of the weight of the board. As can be appreciated resin content levels are much lower than that required when using cotton gin residue [28,36].



**Figure 5.** Particleboard's density

Results of bending strength (MOR) of particleboards produced (Table 3) indicate that the increase in the resin content allows increasing bending strength values, both in the case of plane panels as well as for panels with jute reinforcement. ANSI A208.1 [33] establishes a minimum bending strength value of 3 N/mm<sup>2</sup> for LD-1 panels and 5 N/mm<sup>2</sup> for those classified as LD-2. In the case of medium density panels (M), the required bending strength value corresponds to 11 N/mm<sup>2</sup>. According to this standard, the panels classified as low density (LD-1 and LD-2) are reserved for their application doors insides, while those classified as medium density (M) can be used in commercial, industrial and construction applications. It can be seen that, in the case of samples without reinforcement, it is only possible to reach the minimum value of bending strength for resin contents of 19.3 %. The particleboards that incorporate reinforcement reach a minimum of 3 N/mm<sup>2</sup> and 5 N/mm<sup>2</sup>, for resin contents of 11.9 % and 15.1 %, respectively.

Results obtained indicate that the increase in the density of the material and the resin content have a positive effect on the development of strength (Figure 6) as well as on the stiffness, evidenced by the increase in the modulus of elasticity (MOE) (Figure 7).

In Figure 8 it can be observed that as the resin content increases, the strength difference between samples with and without jute reinforcement increases. It can be explained given that the adhesion between jute and cotton gin waste also increases. When adding jute fabric, although the density does not change significantly, bending strength of particleboards increases, since the jute acts as a mechanical reinforcement, about 3 MPa for 19.3 % of resin, allowing boards to achieve values established by the ANSI A208.1 standard [33]. This effect is not very significant for lower resin contents, since up to 11.90 % resin content it is appreciated that this reinforcement tends to detach from the panel when the failure approaches (Figure 9a). On the contrary,

for resin contents of 15.1 and 19.3 % the jute remains adhered and the breakage of its fibers is observed, showing an effective collaboration that improves mechanical behavior.

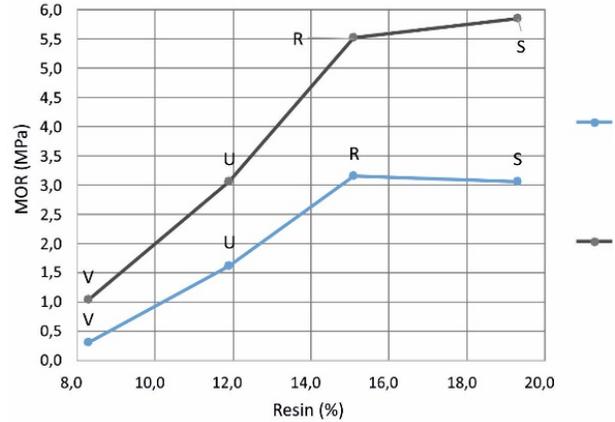


Figure 6. Particleboards bending strength

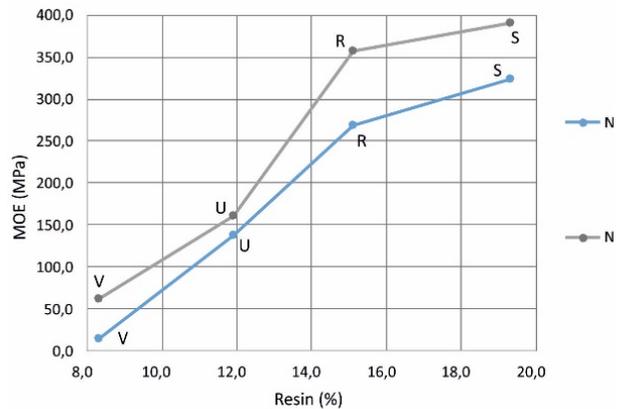


Figure 7. Particleboard's modulus of elasticity

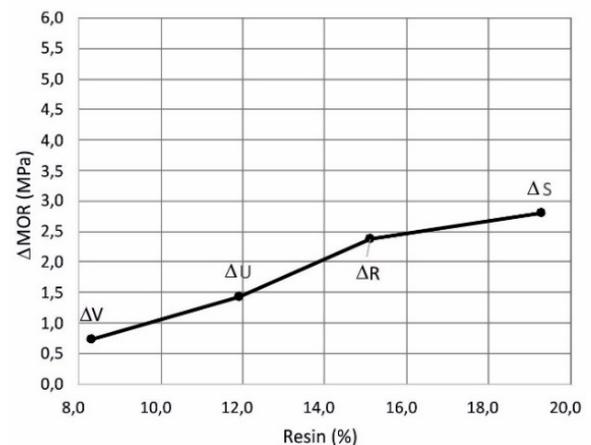
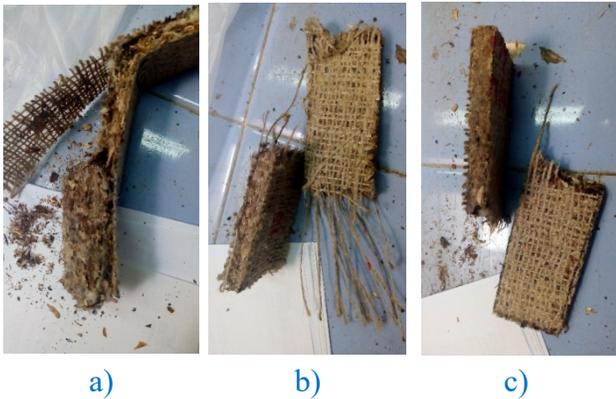


Figure 8. Differential increment in bending strength due to reinforcement incorporation



**Figure 9.** Particleboards with jute reinforcement failure: a) samples U (N+Y); b) samples R (N+Y); c) samples S (N+Y).

Although no other investigations using complete ginning residue have been detected, it has been possible to identify works from other authors working with stalks of cotton plants and carpels, respectively [17, 26-27, 29, 31]. Güller used stalks from cotton plants to make particleboards with urea formaldehyde resin contents of 8 % for the central layer and 10 % for the outer layers. For these particleboards, he obtained densities of 600 and 800 kg/m<sup>3</sup> and bending strength of 11.4 and 15.67 MPa, respectively [17].

This author obtained, for particleboards from cotton stalks and urea formaldehyde resin, variable strength values depending on the resin content of the internal (ML) and external (OL) layers and the final density of 4.38 MPa (density 400 kg/m<sup>3</sup> – 10 % ML – 12 % OL), 8.79 MPa (density 500 kg/m<sup>3</sup> – 10 % ML – 12 % OL), 12.36 MPa (density 600 kg/m<sup>3</sup> – 10 % ML – 12 % OL) and 16.79 MPa (density 700 kg/m<sup>3</sup> – 10 % ML – 12 % OL) [16]. HakkıAlma et al. made particleboards with cotton carpels with urea formaldehyde resin contents of 9 % for the central layer and 11 % for the outer layers. For these boards, he obtained densities of 668 to 693 kg/m<sup>3</sup> and bending strength of approximately 10.5 (unsoaked chips) and 11.5 MPa (chips soaked for 2 weeks) [30].

Results of modulus of elasticity (MOE) are much lower than those achieved by Güller [17], which

reached 2004 and 2705 MPa for panels with urea formaldehyde resin contents of 8 % for the central layer and 10 % for the outer layers. Pirayesh et al [21] obtained for walnut shell agglomerates and 9 to 11 % urea formaldehyde resin content, bending strength values of 6.63 MPa and MOE of 1208.9 MPa.

It is evident that strength level obtained for the particleboards made with the complete ginning residue is affected by its heterogeneity and the presence of particles of different shapes and sizes such as carpels, branches of various sizes and leaves, since the development of adherence between these components is very complex. Thus, it is also diminished by the presence of cotton fibers, which, due to their high surface area and knotting, complicates a complete and uniform impregnation with resin, generating poorly bonded resin-fiber cores where the strength decreases considerably.

#### 4. Conclusions

From the results obtained in the research, it can be concluded that:

- It is possible to produce particleboards from cotton gin waste and urea-formaldehyde resin with properties close to those of low-density commercial boards, complying with the minimum requirements demanded by the standards. Incorporation of jute reinforcements significantly increases bending strength of particleboards, reaching levels required for low density boards by the ANSI 208.1 standard, without incorporating complex steps in the productive process.
- Finding this type of new application area for cotton gin residue can lead to decreasing pressure on the forests, alleviation of raw material shortage of wood industry in developing countries and provide a second income for this crop along with environmental benefits.
- The characteristics of the residue cause important demands for resin to achieve acceptable

physical and mechanical behavior of the particleboards, which translates into higher production costs. Simultaneously, high contents of urea-formaldehyde resin are related to considerable formaldehyde emissions that could be harmful to health.

- From the above arises the need to evaluate alternative of replacement of urea-formaldehyde resin for another one with greater compatibility with cotton gin waste in order to increase strength levels, or the incorporation of formaldehyde sequestering additives to reduce emission levels of this compound.

## 5. Acknowledgements

The completion of this work was possible thanks to the collaboration of the cotton ginning plant ACRIBA S.A. in Villa Minetti (Santa Fe – Argentina), funding from “Secretaría de Ciencia y Tecnología” from Universidad Tecnológica Nacional (Argentina) and collaboration of Instituto de Tecnología Celulósica (FIQ-UNL – Santa Fe – Argentina).

## 6.- Authorship and Contribution

*Agustina Trevisan*: Methodology; validation; formal analysis; research; data curation; writing original draft; writing: revision and editing; visualization. *Luciano Gabriel Massons*: Methodology; validation; research; data curation; writing original draft; writing: revision and editing; visualization. *Florencia Benítez*: Validation; research; data curation; writing original draft; writing: revision and editing; visualization. *María Fernanda Carrasco*: Methodology; validation; formal analysis; resources; writing original draft; writing: revision and editing; visualization; supervision; project administration, acquisition of funds. *Rubén Marcos Grether*: validation; data curation; visualization; supervision. *Ariel Anselmo González*: Validation; data curation; writing original draft; writing: revision and editing.

## References

- [1] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Situación del algodón en la Argentina - Informe campaña 19/20 - Comité Consultivo Internacional del Algodón. [https://icac.org/Content/Event Documents/PdfFiles/lesf65365a1\\_cdae\\_46a2\\_ba9b\\_45d0295f4137/Argentina-2020\\_spanish.pdf](https://icac.org/Content/Event Documents/PdfFiles/lesf65365a1_cdae_46a2_ba9b_45d0295f4137/Argentina-2020_spanish.pdf).
- [2] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Informe sobre situación actual y perspectivas de la producción algodонера Argentina. 69° Reunión de CCIA (Comité Consultivo Internacional del Algodón); Lubbock, Texas (EE. UU.), 2016.
- [3] R.O. Myer, M., Hersom, (12 de November de 2017). Cotton Gin Trash: Alternative Roughage Feed for Beef Cattle. Animal Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Recuperado el 24 de mayo de 2021 de <http://edis.ifas.ufl.edu>.
- [4] K.B., Young, M.U., Ahmed, “Economics of using cotton gin trash as a supplemental feed for range cattle”. *Journal of range management*, Vol. 32 (2), Pp. 123-126, 1979. <https://doi.org/10.2307/3897556>
- [5] V., Ayers, "Farmer Composting of cotton gin trash". Reprinted from the Proceedings of the Beltwide Cotton Conference. Vol. 2, Pp. 1615-1616. National Cotton Council, Memphis TN (EEUU), 1997.
- [6] E., Gordon, T.C., Keisling, L.R., Oliver, C., Harris, “Two methods of composting gin trash”. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32 (3-4), 491-507, 2006. <https://doi.org/10.1081/CSS-100103024>
- [7] A.L., Cravzov, S., Chomiczak, L., Dalla Fontana, J., Marinich, "Evaluación del uso de plaguicidas en cultivos de algodón". In: VI Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la UNNE, Resistencia, Chaco (Argentina), 2000.
- [8] Cravzov, A. L., Traskauskas, C., Delfino, M. R. "Pesticidas en semillas de algodón y desecho de desmote (Pesticides in cotton seeds and ginning trash)". In: XII Congreso Argentino de Toxicología - XXI Jornadas Interdisciplinarias de Toxicología - I Jornada Rioplatense de Toxicología. Rosario, Santa Fe (Argentina), 2001.
- [9] A.L., Cravzov, M.R., Delfino, C.M., Avallone, C., Traskauskas, S., Montenegro, A., Tauguinas, "Carbamatos en semillas de algodón y desecho de desmote".

In: IX Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la UNNE, Resistencia, Chaco (Argentina), 2003.

[10] A., Crossan, F., Sanchez Bayo, I., Kennedy, K., Bodnaruk, K. "Risk of pesticide contamination in cotton seed and livestock". *The Australian cotton grower*, Vol. 27 (1), Pp. 54-56, 2006.

[11] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda 2010. [http://www.censo2010.indec.gov.ar/resultados-definitivos\\_totalpais.asp](http://www.censo2010.indec.gov.ar/resultados-definitivos_totalpais.asp)

[12] L.I., Méndez, R.M., Sotelo, "Reciclo del Marlo de Maíz". Tableros de Partículas. Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP)PROCQMA, ISBN 950-42-0056-7, Universidad Tecnológica Nacional. San Rafael, Mendoza (Argentina), abril 2006.

[13] M.W., Contreras C.M.E., Owen De, J.D.A., Garay, M.Y., Contreras, "Elaboración de tableros aglomerados de partículas de caña brava (*Gynerium sagittatum*) y adhesivo urea-formaldehído". *Revista Forestal Venezolana*, Vol. 43 (2), Pp. 129-135, 1999.

[14] M.P., Gatani, J., Fiorelli, J.C., Medina, R., Arguelo, A., Ruiz, M.F., Nascimento, H., Savastano Jr., H., "Viabilidade técnica de produção e propriedades de painéis de partículas de casca de amendoim". *Revista Matéria*, Vol. 18 (2), Pp. 1286-1293, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000200004>

[15] J.C., Medina, A., Ambrogi, "Cáscara de maní en la elaboración de aglomerados", *Revista Quebracho*, Vol. 2, Pp. 47-53, 1994.

[16] V., Granero, M., Gatani, J.C., Medina, A., Ruiz, J., Fiorelli, J., Kreiker, M.J., Lerda, "Determinación de la influencia del tamaño y forma de partículas de cáscaras de maní en paneles aglomerados". *Revista Quebracho* Vol. 21(1,2), Pp. 67-80, 2013.

[17] C., Güller, R., Ozen, "Some properties of particleboards made from cotton stalks (*Gossypium hirsutum* L.)". *Holz Roh Werkst*, Vol. 62, Pp. 40-43, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0439-9>

[18] L.D., Varandaa, M.F., Do Nascimento, A.L., Christoforo, D.A., Lopessilva, F.A., Roccolahr, "Oat Hulls as Addition to High Density Panels Production". *Materials Research*, Vol. 16(6), Pp. 1355-1361, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000131>

[19] G., Barbirato, N.G., Fiorelli, J., Barrero, N.G.,

Agnolon Pallone, E.M.J., Rocco Lahr, F. A., Christoforo, A.L.; Savastano Jr. "Painel aglomerado híbrido de casca de amendoim reforçado com partículas de madeira Itaúba". *Ciência Florestal*, Vol. 24(3), Pp. 685-697, 2014. <https://doi.org/10.5902/1980509815726>

[20] C., Desirello, S., Cerini, R., Chara-Dia, R., Scalfi, C., Liberman, P.M., Stefani, "Efecto de las condiciones de procesamiento sobre las propiedades mecánicas de aglomerados de cáscara de arroz". CONGRESO SAM/CONAMET 2004. UNL. Santa Fe, Santa Fe (Argentina), 2004.

[21] H., Pirayesh, H., Khanjanzadeh, A., Salari, "Effect to fusing walnut/almond shells on the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particle board". *Composites: Part B*, Vol. 45, Pp. 858-863, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.008>

[22] R.M., Barros Filho, L.M., Mendes, K., Monteiro Novack, L., Oliveira Aprelini, V.R., Botaro, "Hybrid chip board panels based on sugar cane bagasse, urea formaldehyde and melamine formaldehyde". *Industrial Crops and Products*, Vol. 33, Pp. 369-373, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.007>

[23] S., Panyakaew, S., Fotios, "New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse". *Energy and Buildings*, Vol. 43, Pp. 1732-1739, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.015>

[24] X., Li, Z., Cai, J.E., Winandy, A.H., Basta, "Selected properties of particleboard panels manufactured from rice straws of different geometries". *Bioresource Technology*, Vol. 101, Pp. 4662-4666, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.053>

[25] B., Sithole, "New method of measuring the pH of wood chips". *Pulp and Paper*, Vol. 106 (11), Pp. 42-45, 2005.

[26] C., Güller, "Research on the production of the composite panels from some agricultural residues". *Pro Ligno*, Vol. 11 (4), Pp. 187-191, 2015.

[27] [27] Y., Cöpür, C., Güller, M., Akgül, C., Tascioglu, "Some chemical properties of hazelnut husk and its suitability for particleboard production." *Building and Environment*, Vol. 42, Pp. 2568-2572, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.011>

[28] H., Eroglu, "Fiberboard industry. Karadeniz Technical University Publication", Vol. 304, Pp. 212, 1992.

[29] C., Güller, Y., Cöpur, C., Tascioglu, "The manufacture of particleboards using mixture of peanut hull (*Arachis hypoqaea* L.) and European Black pine (*Pinus nigra* Arnold) wood chips". *Bioresource Technology*, Vol. 99, Pp. 2893-2897, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.06.013>.

[30] M., Hakki Alma, H., Kalaycioglu, I., Bektas, A., Tutus, "Properties of cotton carpel-based particle boards". *Industrial Crops and Products*, Vol. 22, Pp. 141-149, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.08.001>.

[31] J.I., Brumbaugh, "Effect of flake dimensions on properties of particleboard". *Forest Products Journal* Vol. 10 (5), Pp. 243-246, 1960.

[32] R., Argento, L., Sosa, M.C., Balbi, M., Ciotti, M.F., Carrasco, M., Maximino, J., Ferreyra, A., González, A. "Evaluación del proceso productivo de aglomerados basados en residuos de algodón y los tratamientos empleados". In: III Encuentro Latinoamericano y Europeo de Edificaciones y Comunidades Sostenibles (Euro Elecs 2019), Santa Fe-Paraná (Argentina), 2019.

[33] ANSI 208.1. Particleboard. American National Standards Institute, 1999.

[34] H., Khanjanzadeh, A.A., Bahmani, A., Rafighi, T., Tabarsa, "Utilization of biowaste cotton (*Gossypium hirsutum* L.) stalks and underutilized paulownia (*paulownia fortunei*) in wood-based composite particleboard". *African Journal of Biotechnology*, Vol. 11(31), Pp. 8045-8050, 2012. <https://doi.org/10.5897/AJB12.288>.

[35] G., Nemli, S., Yildiz, E., Derya Gezer, "The potential for using the needle litter of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) as a raw material for particleboard manufacturing". *Bioresources Technology*, Vol. 99 (14), Pp. 6054-8. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.044>.

[36] M.H., Chan Martín, O., Araujo Molina, O. M., Azueta García, L.E., Solís Rodríguez, "Tableros de madera de partículas". *Artículo de divulgación / Ingeniería*, Vol. 8-3, Pp. 39-46, 2004.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Síntesis verde de materiales nanoestructurados de ZnO en la degradación de contaminantes orgánicos por medio de la fotocatalisis heterogénea

*Green synthesis of materials nanoestructurados of ZnO in the degradation of organic polluting agents by means of the heterogenous photocatalysis*

Manuel de Jesús Rodríguez Ortiz, Ricardo Hoffmann Valencia , Guillermo Amaya Parra , Priscy Alfredo Luque Morales 

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana No. 3917, Zona Playitas, CP. 22860 Ensenada, Baja California, México.

**Autor de correspondencia:** Guillermo Amaya Parra, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana No. 3917, Zona Playitas, CP. 22860 Ensenada, Baja California, México. E-mail: [amaya@uabc.edu.mx](mailto:amaya@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0001-5375-1092.

**Recibido:** 18 de Julio del 2021

**Aceptado:** 11 de Octubre del 2021

**Publicado:** 29 de Octubre del 2021

**Resumen.** - *El óxido de zinc (ZnO) es un material con un amplio repertorio de propiedades ópticas, piezoeléctricas, actividad antimicrobiana, semiconductividad y fotocatalíticas que lo hacen útil en un gran número de aplicaciones. Sin embargo, el aumento de la preocupación por el impacto medio – ambiental ha llevado a desarrollar procesos ecológicos para su producción. En los últimos años, la síntesis verde de materiales nanoestructurados ha ganado atención por ser un método no complejo, económico y respetuoso con el medio ambiente en contraste con los métodos físicos y de síntesis química. Se han desarrollado diferentes nanomateriales empleando sustratos biológicos de entre los cuales los más estudiados son los extractos vegetales que funcionan como una fuente de agentes reductores y / o estabilizadores. Por lo tanto, la presente revisión incluye un resumen de las diferentes fuentes de extractos vegetales y metodologías aplicadas a la síntesis verde de nanopartículas y películas delgadas de óxido de zinc y los avances en cuanto a la eficiencia de la actividad fotocatalítica de los materiales sintetizados. En este trabajo también presentamos un mapeo bibliométrico sobre el crecimiento de estudios en la materia en un periodo de 10 años comprendido entre el año 2011 y el 2020.*

**Palabras clave:** Síntesis verde; Fotocatalisis; Nanomateriales.

**Abstract.** - *Zinc oxide (ZnO) is a material with a broad repertoire of optical, piezoelectric, antimicrobial activity, semi – conductivity, and photocatalytic properties that make it useful for many applications. However, increasing concern about environmental impact has led to the development of green processes for its production. In recent years, the green - synthesis of nanostructured materials has drawn attention as a non-complex, cost-effective, and environmentally friendly method in contrast to physical and chemical synthesis methods. Different nanomaterials have been developed using biological substrates among which the most studied are plant extracts that serve as a source of reducing agents and/or stabilizers. Therefore, the present review includes a summary of the different sources of plant extracts and methodologies applied to the green synthesis of zinc oxide nanoparticles and thin films and the advances of the photocatalytic activity of synthesized materials in terms of efficiency. In this work, we also present a bibliometric mapping of the growth of studies in the field for 10 years from 2011 to 2020.*

**Keywords:** Green synthesis; Photocatalysis; Nanomaterial



## 1. Introducción

La contaminación del agua afecta la salud pública, el ambiente y el bienestar económico de todas las naciones. Dado que los orígenes de la contaminación son diversos y su mitigación muy complicada, su política pública hace de este tema uno de los problemas ambientales más difíciles de manejar. A pesar del progreso observado en los últimos cuarenta años, la mala calidad del agua es uno de los problemas más serios a los que se enfrenta el planeta. Datos de la Organización Mundial de la Salud indican que más del 80 % del agua utilizada en el mundo no recibe ningún tratamiento. Existe entonces una gran necesidad de más y mejores regulaciones respecto a los límites máximos permisibles de contaminantes generados en descargas de industrias que producen sustancias tóxicas. Muchos autores reconocen que esta deficiencia en la regulación se debe a que los gobiernos tienen como prioridad un rápido desarrollo económico por encima de cualquier costo ambiental [1].

La presencia de colorantes en las aguas residuales supone una grave problemática desde el punto de vista medioambiental, no sólo por sus efectos tóxicos sino también estéticos. Se estima que existen más de 100000 colorantes comerciales disponibles y la producción total mundial alcanza más de 700000 toneladas al año. El color es fácilmente identificable en las aguas (menos de 1 ppm para algunos colorantes) y es el primer síntoma de contaminación en ser detectado. Las descargas de los colorantes en altas concentraciones a océanos y mantos acuíferos poseen una fuente importante de contaminación debido a su naturaleza recalcitrante, este dará el color indeseable a la masa de agua que reducirá la penetración de la luz solar, resistencia fotoquímica y ataques biológicos para la vida acuática [2].

### 1.1 Óxido de Cinc - ZnO

El ZnO es un material semiconductor, tipo n, de la familia II-VI, con masa molar de 81,406 g/mol, punto de fusión de 1974 ° C y densidad de 5,1 g/cm<sup>3</sup> que en condiciones ambientales posee una estructura hexagonal tipo wurtzita, con parámetros de red  $a = 0.325$  nm y  $c = 0.5201$  nm (figura 1a) y pertenece al grupo espacial P6<sub>3</sub>mc. Ésta es la fase más estable, debido a que la diferencia de electronegatividades entre el zinc (1.65) y el oxígeno (3.44) produce un alto grado de ionicidad, lo que provoca una repulsión considerable en sus nubes de carga. Así, cada ion de Zn<sup>2+</sup> está ligado a un tetraedro de cuatro iones O<sup>2-</sup>, representando una estructura que puede ser descrita como una serie de planos alternados de iones de zinc y oxígeno apilados a lo largo del eje c. El ZnO también puede presentarse en la estructura de blenda de zinc (Figura 1 b), la cual puede obtenerse creciendo el ZnO sobre sustratos con estructura cristalina cúbica, y la estructura de sal de roca (NaCl) (Figura 1 c) puede obtenerse a presiones relativamente altas. Con respecto a la estructura que más común que se presenta en el ZnO (hexagonal tipo wurtzita) se tienen los planos polares (001) y (00<sup>-</sup>1) determinadas en Zn y O respectivamente (orientadas hacia el eje c) y las caras no polares (110) y (100), orientadas hacia el eje a, que contienen igual número de átomos de Zn y O (Figura 2) [3].

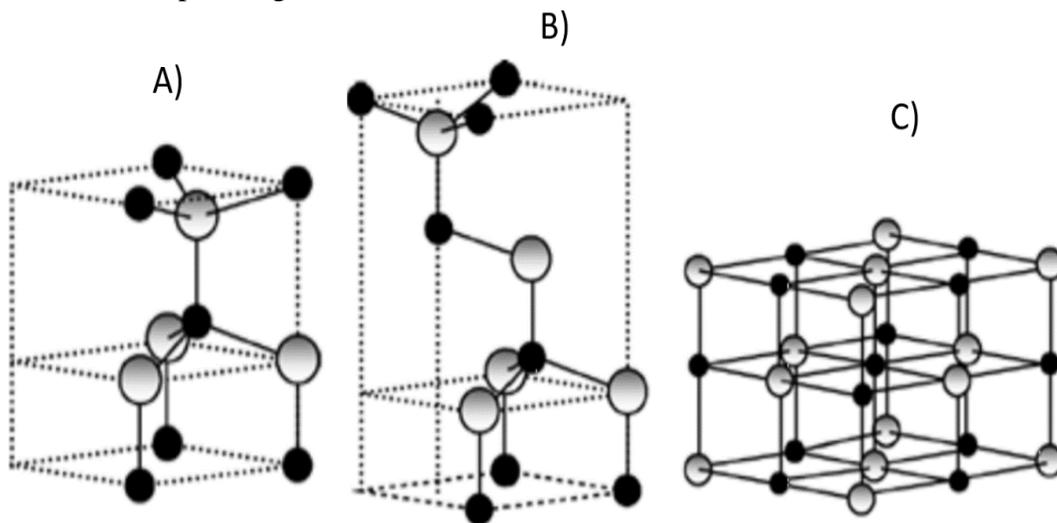
El ZnO es un semiconductor que en los últimos años en la ciencia de materiales ha despertado gran interés debido a que posee cualidades que lo hacen superior con respecto a sus propiedades. Exhibe un alto coeficiente piezoeléctrico (1.2 cm<sup>-2</sup>), una conductividad térmica mayor que otros materiales de su tipo (unos 0.05 WK<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> más que el GaAs) y la mayor energía de enlace de excitón (60 meV) de todos los semiconductores II-VI y III-V; además, su valor de energía de banda prohibida es de 3.2 eV., esto lo hace tener diversas aplicaciones tecnológicas, como son sensores de gas, láser ultravioleta y visible, como



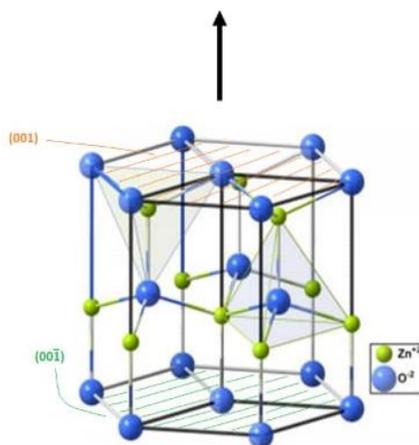
componente en la celdas solares y celdas fotocatalíticas, en catalizadores fotocatalíticos, entre otras aplicaciones. [4] [5]

El óxido de zinc nanoestructurado presenta un comportamiento diferente en fotocatalisis en comparación a su contraparte a granel a causa de

una elevada área superficial, alta actividad catalítica y una gran energía de banda prohibida, lo cual le otorga una mayor ventaja y también lo hace tener amplias aplicaciones en diferentes áreas como optoelectrónica, cosméticos, textil, cerámicos, etc. [6]



**Figura 1.** Estructuras cristalinas del ZnO, las esferas grises y negras representan al Zn y al O, respectivamente. A) Wurtzita, B) Blenda de Zinc y C) Sal de roca [3].



**Figura 2.** Planos de la estructura tipo wurtzita (ZnO) Modificado de [3].

## 1.2 Química verde

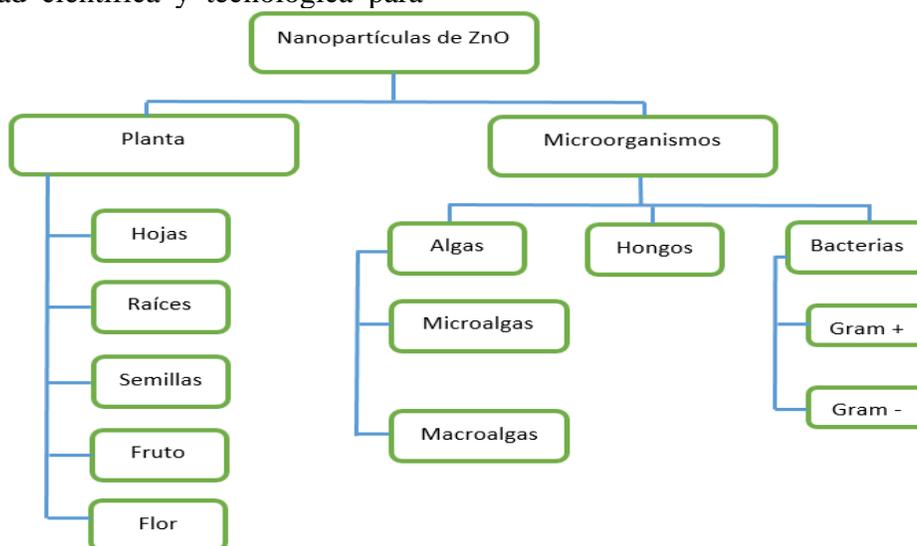
En un enfoque ecológico la implementación de química verde consiste en el esfuerzo colectivo

para reducir al mínimo, o de ser posible eliminar por completo la contaminación producida en procesos químicos evitando al máximo el desperdicio o uso indiscriminado de materias primas no renovables, así como el empleo de materiales peligrosos o contaminantes en la elaboración de productos químicos “limpios”, que no atenten contra la salud o el ambiente. El enfoque de química verde se esfuerza por lograr la sostenibilidad a nivel molecular. Debido a este objetivo, no es de extrañar que se haya aplicado a todos los sectores industriales. Desde la industria aeroespacial, automotriz, cosmética, electrónica, energética, textil, productos para el hogar, farmacéutica, hasta agricultura, hay cientos de ejemplos de aplicaciones exitosas de tecnologías premiadas y económicamente competitivas [7].



Es por ello por lo que en la actualidad dicho tema ha ganado gran popularidad captando la atención de la comunidad científica y tecnológica para

desarrollar tecnologías enfocadas en química verde.



**Figura 3.** Diferentes fuentes verdes para la síntesis de nano partículas de ZnO. Fuente: elaboración propia.

La biosíntesis o síntesis verde de nanopartículas es un enfoque para sintetizar partículas nanoestructuradas a través de microorganismos (bacterias, hongos y algas) y plantas (figura 3). Estas cepas naturales y extractos de plantas secretan algunos fotoquímicos que actúan tanto

como agentes reductores como agentes estabilizadores o de protección; Dicho método limita el uso de productos químicos costosos y tóxicos. Este enfoque es respetuoso con el medio ambiente, rentable, biocompatible, seguro y ecológico.

### 1.3 Síntesis verde de Nanopartículas de ZnO

Las plantas son la fuente más preferida de síntesis de nano partículas porque conducen a la producción a gran escala y las producciones de NP estables, variadas en forma y tamaño. La biorreducción implica reducir los iones u óxidos metálicos a NP de metales de valencia 0 con la ayuda de fitoquímicos como polisacáridos, compuestos poli – fenólicos, vitaminas, aminoácidos, alcaloides, terpenoides secretados por la planta además, permite la producción de nanopartículas de ZnO libres de impurezas adicionales [8]. El tamaño nanométrico de las nanopartículas de ZnO varía el nivel de Fermi en

comparación a otros semiconductores y da lugar a un potencial de reducción menor del metal en su superficie. Además, en las nanopartículas también ha aumentado la superficie disponible en comparación con la del sólido extendido, lo que se traduce en un mayor rendimiento catalítico. Una de las limitaciones de las nanopartículas en fotocatalisis es que el efecto resonante limita el ancho de banda de absorción (típicamente  $\approx 50$  nm o menor para nano – esferas uniformes) aunque se pueden usar nanopartículas más heterogéneas. La otra es que el coeficiente de absorción suele ser bajo debido a la fuerte dispersión de la luz [9].



El método más comúnmente aplicado para la preparación simple de nanopartículas de ZnO a partir de extractos de plantas, es donde la parte de la planta se lava a fondo con agua corriente del grifo y se esteriliza con agua bidestilada. Luego, la parte de la planta se guarda para secar a temperatura ambiente, luego se pesa y luego se tritura con un mortero. Se agrega H<sub>2</sub>O ultra – pura a la parte de la planta de acuerdo con la concentración deseada y la mezcla se hierve bajo agitación continua usando un agitador magnético. La solución se filtra con papel de filtro Whatman y la solución transparente obtenida se utiliza como extracto vegetal (muestra). Se mezcla una parte del extracto con nitrato de zinc hidratado u óxido de zinc o sulfato de zinc y la mezcla se hierve a la temperatura y el tiempo deseados para lograr una mezcla eficiente. Algunos realizan la optimización en este punto utilizando diferentes temperaturas, pH, concentración de extracto y tiempo [10].

#### 1.4 Síntesis verde de películas delgadas de ZnO

Al emplear fotocatalizadores en polvo, suspendidos en el medio a descontaminar, éstos sufren procesos de agregación que pueden afectar negativamente la eficiencia por la disminución del área superficial disponible. La fotocatalisis basada en polvos presenta la desventaja de requerir una etapa adicional de separación y recuperación del material para que pueda ser reutilizado [3] [11]. Estos problemas pueden superarse utilizando películas delgadas como fotocatalizadores. Sin embargo, su actividad fotocatalítica es menor que la del polvo, provocado por la reducción de la superficie. La modificación de la superficie de películas delgadas como la porosidad, la homogeneidad de la película y la distribución del tamaño de los poros es indispensable para mejorar la actividad fotocatalítica [12]. Adicionalmente, es necesario hacer una selección adecuada del sustrato, para

evitar una interacción perjudicial con el fotocatalizador [13].

Para la caracterización de nanopartículas y películas delgadas de ZnO comúnmente se utilizan diferentes técnicas de caracterización como espectroscopia UV-Vis, difracción de rayos X (XRD), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopia electrónica de barrido (SEM), microscopia electrónica de transmisión (TEM), espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS), análisis termo gravimétrico (TGA), microscopia de fuerza atómica (AFM), espectroscopia de fotoluminiscencia (PL) [11], [14]–[16] entre otras.

#### 1.5 Tecnologías avanzadas de oxidación – Fotocatálisis heterogénea

Debido a que los métodos convencionales de tratamiento del agua como los tratamientos primarios (la sedimentación, la coagulación, etc.), los tratamientos secundarios (filtración biológica, lodos activados, etc.) y terciarios (tratamientos físicos, químicos y/o biológicos), resultan insuficientes para la eliminación de contaminantes recalcitrantes, como los colorantes, los pesticidas, los medicamentos y los metales pesados, que aún en bajas concentraciones producen severos daños a la salud y el medio ambiente. Se han desarrollado e implementado tecnologías avanzadas de oxidación (TAOs) de la materia orgánica, toxica y no toxica, contenida en las aguas residuales industriales. Esta tecnología se basa en procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios en la estructura química de los contaminantes hasta su mineralización, transformando la materia orgánica en dióxido de carbono y agua [17].

De entre las TAOs, se presenta la fotocatalisis heterogénea la cual ha despertado mayor interés en los investigadores, debido a su eficiencia en la destrucción no selectiva de los contaminantes

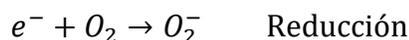
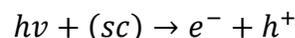
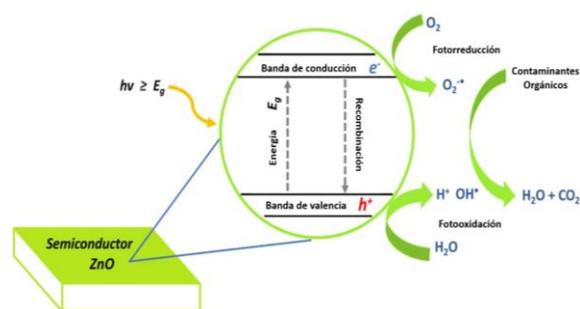


que terminan en forma de subproductos inofensivos. Por otro lado, los procesos fotocatalíticos resultan ser más económicos y prácticos, por lo que tienen el potencial de ser aplicados como pretratamiento o como un proceso complementario en las plantas de tratamiento convencionales [18].

La fotocatalisis heterogénea con luz solar es un proceso de oxidación avanzada, a grandes rasgos en este proceso se emplea la luz solar que llega a la superficie terrestre para generar reacciones químicas de óxido reducción que dan lugar a la eliminación de los compuestos orgánicos, utilizando un óxido metálico semiconductor como fotocatalizador. Dicho proceso se basa en la absorción (directa o indirecta) de energía radiante (visible o UV) por un sólido (el fotocatalizador, que normalmente es un semiconductor de banda ancha). En la superficie del contacto interfacial entre sólido y la solución ocurren las reacciones de destrucción de los contaminantes, sin que el catalizador sufra cambios químicos [19].

En la figura 4 se presenta esquemáticamente el mecanismo de reacción general en fotocatalisis heterogénea que ocurre en una partícula de catalizador cuando ésta es excitada directamente con luz suficientemente energética. Para explicar dicho mecanismo de reacción, se considera el proceso de oxidación avanzada ya antes mencionado, que este emplea el poder disociativo de luz sobre moléculas para producir especies con alto poder oxidativo como radicales  $OH^*$  (hidroxilo). También cabe mencionar que la banda ocupada por los orbitales moleculares con los electrones de valencia se llama banda de valencia (VB), mientras que la banda formada por los orbitales moleculares vacíos se llama banda de conducción (CB). Además, en los semiconductores la banda de valencia no se solapa con la de conducción, esto significa que están separadas entre sí por una zona intermedia llamada banda prohibida. Entonces cuando

tenemos un colorante y se le agrega un semiconductor, y lo iluminamos con luz UV esta tiene mayor energía ( $Luz\ UV = 3.94\ eV$ ) que la energía de banda prohibida, entonces un electrón ( $e^-$ ) se mueve desde la VB hacia la CB creando un hueco en la VB. Los pares electro-huecos creados se separan y generan portadores de carga eléctrica que migran a la superficie del sólido donde reaccionan con  $H_2O$  y  $O_2$  adsorbidos, dando como resultado la formación de especies activas como los radicales hidroxilos ( $OH^*$ ), el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y los súper óxidos ( $O_2^-$ ) que catalizan en la superficie de la partícula semiconductor [20]–[22].



**Figura 4.** Mecanismo de reacción general en fotocatalisis heterogénea. Fuente: elaboración propia con base en [20], [23].

## 2. Métodos

### 2.1. Mapeo bibliométrico

Se realizó un mapeo bibliométrico, para conocer la evolución y/o crecimiento en publicaciones sobre la síntesis verde de nanopartículas de ZnO y el depósito de películas delgadas de ZnO asistido por una metodología verde. La búsqueda se realizó en las bases de datos *Scopus*, *Web of science* y *Scielo*, en un periodo de tiempo de 10 años comprendido entre el año 2011 y el 2020 de acuerdo con las palabras clave síntesis – verde,



películas delgadas, nanopartículas y óxido de zinc, en el idioma inglés.

Adicionalmente se realizó una búsqueda en las bases de datos *Scopus* y *Web of science* donde se muestran algunos de los materiales semiconductores y fotocatalizadores más estudiados en un periodo de tiempo de 5 años comprendido entre el año 2016 y 2020, esta búsqueda se realizó solo en los últimos 5 años para identificar además cuales son los semiconductores con mayor presencia en el escenario científico en la actualidad, a diferencia de la búsqueda pasada donde realizamos un mapeo en los últimos 10 años para obtener una mayor cantidad de datos y hacer una justa comparación entre el número de publicaciones sobre nanopartículas y películas delgadas de ZnO.

## 2.2. Vigilancia tecnológica.

En las siguientes Tablas 1 y 2 se realizaron con el fin de comparar dos diferentes morfologías (nanopartículas y películas delgadas) para sintetizar ZnO para aplicación fotocatalítica en la degradación de contaminantes, donde presenta el primer apartado de referencias donde podrás encontrar información a fondo sobre dichos

trabajos, el siguiente apartado es la fuente iónica metálica que utilizaron, en este caso de zinc, después se encuentra el apartado sobre el sustrato biológico que se utilizó lo cual nos especificamos en extractos de planta y los últimos tres apartados que engloban a la fotocatalisis son el tiempo de degradación en minutos, la eficiencia de degradación en porcentaje y el colorante que se utilizó para evaluar la degradación fotocatalítica.

La Tabla 1 es un estudio exhaustivo de diferentes plantas utilizadas para la síntesis de nanopartículas de ZnO en un rango de 5 años de antigüedad hasta la actualidad, además dichos trabajos comparten en común la aplicación de las nanopartículas en fotocatalisis para degradación de contaminantes, por ejemplo se lograron sintetizar nanopartículas de ZnO con la planta *Citrus × limón* lo cual logro degradar 87% del contaminante RB 21 en 270 minutos [19], en otro trabajo utilizando plantas de la misma familia *Citrus × paradisi* y *Citrus × sinensis*, se logró observar 77 y 95 % de degradación del contaminante colorante azul de metileno en un tiempo de 180 minutos [23], en este sentido, la mayoría de los trabajos mostraron degradación fotocatalítica en un rango similar demostrado por espectroscopia UV-Vis.



**Tabla 1.** Síntesis de nanopartículas de ZnO mediada por plantas con aplicación fotocatalítica.

Referencia	Fuente de Zn	Sustrato biológico	Fotocatálisis		
			Tiempo (Min)	Degradación %	Contaminante
[24]	Zn(O <sub>2</sub> CCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> - Acetato de zinc	<i>Citrus × limón</i> (Jugo)	270	87	RB 21
[15]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – Nitrato de zinc	<i>Scutellaria baicalensis</i> (raíces)	210	98.6	Azul de metileno
[25]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – Nitrato de zinc	<i>Carissa edulis</i> (fruto)	130	97	Rojo Congo
[26]	Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> *2H <sub>2</sub> O - Acetato de zinc dihidrato	<i>Ferulago angulata (schlecht) boiss</i>	150	93	Rodamina B
[27]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O - Nitrato de zinc hexahidratado	<i>Citrus × paradisi, Citrus × sinensis y Solanum lycopersicum</i> (cascaras)	180	77, 95 y 97	Azul de metileno
[16]	Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> *2H <sub>2</sub> O - Acetato de zinc dihidrato	<i>Moringa Oleifera</i> (Hojas)	60	96	Amarillo titán
[28]	Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> *2H <sub>2</sub> O - Acetato de zinc dihidrato	<i>Eriobotrya japónica</i> (Semillas)	200	57	Azul de metileno
[29]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O - Nitrato de zinc hexahidratado	<i>Cydonia oblonga</i> (Quince - semillas)	120	80	Azul de metileno
[30]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O - Nitrato de zinc hexahidratado	<i>Ziziphus jujuba</i> (Fruto)	300	73	Azul de metileno
[31]	Zn(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> *2H <sub>2</sub> O - Acetato de zinc dihidrato	<i>Abelmoschus esculentus</i> (okra)	60 y 50	95 y 100	Azul de metileno y Rodamina B
[32]	Zn(O <sub>2</sub> CCH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> - Acetato de zinc	<i>Kalopanax septemlobus</i>	30	97	Azul de metileno
[33]	ZnSO <sub>4</sub> - Sulfato de zinc	<i>Trianthema portulacastrum</i>	150	91	Azul marino de sinozol K-BF
[34]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O - Nitrato de zinc hexahidratado	<i>Ruta chalepensis</i> (Hojas)	60	74, 91 y 92	Azul de metileno, Índigo carmín y Verde malaquita
[35]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O - Nitrato de zinc hexahidratado	<i>Amomum longiligulare</i> (fruto)	60	66 y 38	Azul de metileno y Verde malaquita
[36]	Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – Nitrato de zinc	<i>Rubus coreanus</i> (fruto)	240	90	Verde malaquita

Fuente: elaboración propia.



En la Tabla 2 (filas 1 - 8) se muestran algunos resultados sobre el crecimiento de películas delgadas de ZnO por medio de rutas de síntesis verde, mientras que en la misma tabla filas 9 – 10, se muestra dos trabajos sobre el crecimiento de películas delgadas de ZnO por el método recubrimiento por rotación sol – gel.

En la mayoría de los trabajos sobre el crecimiento de películas delgadas de ZnO por medio de rutas de síntesis verde, no se llegó a medir o registrar una aplicación, aunque si se mencionan muchas

posibles aplicaciones, entre las que destacan, superficies antimicrobianas, superficies auto – limpiantes, transistores, y por supuesto fotocatalisis. El empleo de extractos vegetales es reportado con un agente reductor, quelante estabilizador, tal como lo haría la etanolamina o monoetanolamina en los procesos de depósito vía sol – gel [13], [37], [38]. Se encontró también que la fuente de iones metálicos no es muy diferente a las que se emplea en la síntesis de nanopartículas.

**Tabla 2.** Crecimiento de películas delgadas de ZnO por medio de rutas de síntesis verde.

Referencia	Fuente de zinc	Sustrato biológico	Fotocatalisis		
			Tiempo	% degradación	Colorante
[39]	Nitrato de zinc	<i>Citrus aurantifolia</i>			
[40]	Acetato de zinc dihidratado	<i>Mimosa pudica</i>			
[41]	Acetato de zinc dihidratado	<i>Chromalena odorata</i>			
[42]	Nitrato de zinc	<i>Citrus reticulata</i>			
[43]	Nitrato de zinc	<i>Corn husk</i>			
[44]	Nitrato de zinc	<i>Allium sativum</i>	120	69	Azul de metileno
[45]	Acetato de zinc dihidratado	<i>Viburnum opulus</i>			
[46]	Nitrato de zinc	<i>Punica granatum</i>			
[11]	Acetato de zinc	<i>n/a</i>	240	50	Rodamina B
[47]	Acetato de zinc dihidratado	<i>n/a</i>	240	93	Rodamina B

Fuente: elaboración propia.

### 3. Resultados y discusión

En la (tabla 3), se muestran los resultados obtenidos de buscar las palabras clave antes mencionadas en la sección “métodos”. De acuerdo con las bases de datos consultadas, existen los trabajos en cuanto al depósito de películas delgadas de ZnO, asistido por

metodologías verdes, es aún muy inferior comparado con la síntesis – verde de nanopartículas de óxido de zinc (figura 5), debido a que el depósito de películas delgadas representa una disminución en el área superficial, representa un proceso más largo, lo que podría significar también una mayor área de oportunidad.



Tabla 3. Criterios de búsqueda y bases de datos.

Palabras clave	Resultados en bases de datos		
	Web of science	Scopus	Scielo
Síntesis – verde Y películas – delgadas Y ZnO	74	84	1
Síntesis – verde Y nanopartículas Y ZnO	1180	1201	4

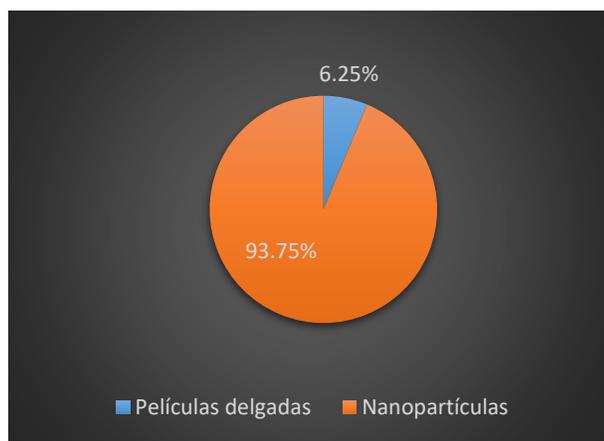


Figura 5. Porcentaje de publicaciones de acuerdo con el tipo de material nanoestructurado. Fuente: elaboración propia.

La síntesis – verde de nanopartículas no solo presenta una mayor cantidad de resultados, sino que además presenta un mayor crecimiento mientras que el depósito de películas en los primeros y últimos 5 años del rango seleccionado fue del 37% y 63% respectivamente (figura 6) contra un 19% y 81% para los primeros y últimos 5 años respectivamente en la síntesis verde de nanopartículas de ZnO (Figura 7). Lo que significa que hay un interés mayor y con más crecimiento en la síntesis – verde de nanopartículas atribuible a que estas poseen mayor área superficial, sus características

morfológicas manipulables, lo que se refleja en una mayor eficiencia fotocatalítica.

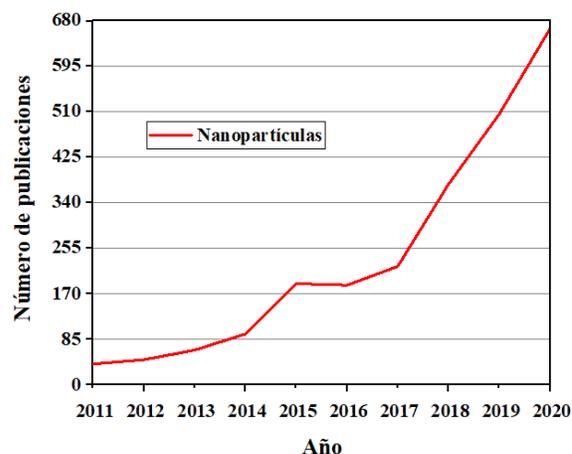


Figura 6. Publicaciones sobre nanopartículas de ZnO

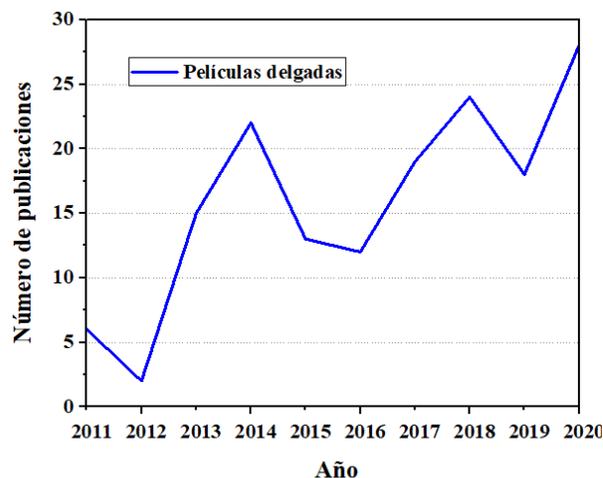
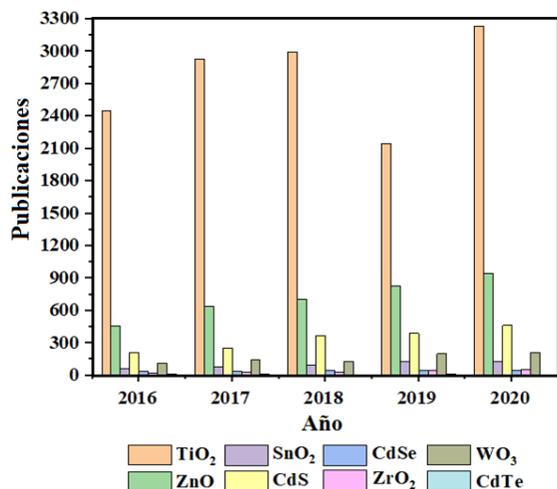


Figura 7. Publicaciones sobre películas delgadas de ZnO en bases de datos. Fuente: elaboración propia.

Además nos dimos la tarea de realizar una búsqueda de los fotocatalizadores más utilizados en los últimos 5 años partiendo del 2016 a la actualidad para compararlos con el fotocatalizador de ZnO sin importar morfologías o métodos de obtención, los resultados de la búsqueda demuestran que el material fotocatalizador más utilizado es el TiO<sub>2</sub> con el 66% de todas las publicaciones (figura 8), sin embargo, el ZnO ha demostrado ser de mucho



interés para los investigadores pues, aunque solo representa el 17% del total de publicaciones mostradas, ha tenido un crecimiento importante de 2.06 veces en el año 2020 con respecto al año 2016 para el TiO<sub>2</sub>. El resto de los fotocatalizadores representan solo 17% de todas las publicaciones encontradas.



**Figura 8.** Semiconductores y fotocatalizadores más estudiados en un periodo de tiempo de 5 años comprendido entre el año 2016 y 2020. Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

Se comparó el número de publicaciones o trabajos sobre películas delgadas de ZnO contra nanopartículas de ZnO, lo cual se observó una gran diferencia de desarrollo siendo la de mayor atención las nanopartículas, podríamos atribuir esto a que primero se empezó a trabajar con nanopartículas que con películas delgadas, y que las propiedades que presentan las nanopartículas son mejores que las de películas delgadas, además la nanotecnología aunado de la química verde es una ciencia relativamente nueva aun en desarrollo lo cual aún hace limitados los trabajos en este ámbito.

Al no existir suficiente evidencia sobre experimentos fotocatalíticos sobre películas

delgadas de ZnO crecidas por una ruta de síntesis verde y poderlas comparar con la síntesis verde de nanopartículas de ZnO decidimos agregar al menos dos trabajos (tabla 2, filas 9 y 10) y los resultados son algo que se esperaba, el rendimiento fotocatalítico de las nanopartículas es mayor que el de las películas delgadas debido en mayor medida al aumento del área superficial que ofrece una partícula dispersa en el medio a tratar que una partícula adherida a un sustrato.

Gracias a las características mencionadas con anterioridad sobre el ZnO sintetizado a partir de extractos de plantas y el enfoque que se le ha dado en las diferentes áreas de investigación con respecto al estudio de los métodos de síntesis, parámetros, mecanismos de crecimiento, propiedades y aplicaciones, es evidente que podemos seguir desarrollando dicho material semiconductor de manera que en el futuro cercano el ZnO será totalmente viable de muchas más aplicaciones tanto para películas delgadas como para nanopartículas de ZnO.

#### 5. Agradecimiento de autoría

Manuel de Jesús Rodríguez Ortíz: Escritura - Borrador original, Investigación, Metodología, Análisis; Ricardo Hoffmann Valencia: Escritura - Borrador original, Investigación, Metodología, Análisis; Guillermo Amaya Parra: Conceptualización, Supervisión, Administración de proyecto, Escritura: revisión y edición; Priscy Alfredo Luque Morales: Supervisión, Administración de proyecto, Escritura: revisión y edición.



## Referencias

- [1] A. P. Acuña, "La calidad del agua: un eje clave de política pública," *Perspect. IMTA*, vol. 3, 2020.
- [2] D. Baena Baldiris, "Degradación catalítica y toxicidad de los colorantes rojo ponceau y naranja de metilo empleando la cepa bacteriana *Ims*." Universidad de Cartagena, 2020.
- [3] R. Ahumada Lazo, *Crecimiento Y Caracterización De Películas De Óxido De Zinc Por " Sputtering " Para Su Potencial Aplicación En Fotocatálisis (Tesis de maestría)*. México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014.
- [4] V. Parihar, M. Raja, and R. Paulose, "A brief review of structural, electrical and electrochemical properties of zinc oxide nanoparticles," *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 2, pp. 119-130, 2018. <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0009>
- [5] G. Bolivar, "Óxido de cinc (ZnO): estructura, propiedades, usos, riesgos.," *Lifeder*, 2019.
- [6] A. Kołodziejczak-Radzimska and T. Jesionowski, "Zinc oxide-from synthesis to application: a review," *Materials (Basel)*, vol. 7, no. 4, pp. 2833-2881, 2014. <https://doi.org/10.3390/ma7042833>
- [7] M. Lancaster, *Green chemistry: an introductory text*. Royal society of chemistry, 2020.
- [8] H. Agarwal, S. Venkat Kumar, and S. Rajeshkumar, "A review on green synthesis of zinc oxide nanoparticles - An eco-friendly approach," *Resour. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 406-413, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2017.03.002>
- [9] M. González-Béjar, "Química sostenible y fotocatalisis: nanopartículas metálicas como fotocatalizadores para la síntesis de compuestos orgánicos," *An. Quím.*, vol. 114, no. 1, pp. 31-38, 2018.
- [10] M. A. Fagier, "Plant-Mediated Biosynthesis and Photocatalysis Activities of Zinc Oxide Nanoparticles: A Prospect towards Dyes Mineralization," *J. Nanotechnol.*, vol. 2021, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6629180>
- [11] D. Aryanto et al., "Characteristics and photocatalytic activity of highly c-axis-oriented ZnO thin films," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 96, no. 1, pp. 226-235, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05361-5>
- [12] Y. M. Hunge, M. A. Mahadik, A. V Moholkar, and C. H. Bhosale, "Photoelectrocatalytic degradation of phthalic acid using spray deposited stratified WO<sub>3</sub>/ZnO thin films under sunlight illumination," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 420, pp. 764-772, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.221>
- [13] D. Aryanto, E. Hastuti, N. Husniya, T. Sudiro, and B. W. Nuryadin, "Synthesis, characterization, and photocatalytic properties of nanocrystalline NZO thin films," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 985, no. 1, p. 12025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/985/1/012025>
- [14] A. Jiamprasertboon et al., "Photocatalytic and electrically conductive transparent Cl-doped ZnO thin films via aerosol-assisted chemical vapour deposition," *J. Mater. Chem. A*, vol. 6, no. 26, pp. 12682-12692, 2018. <https://doi.org/10.1039/C8TA01420E>
- [15] L. Chen et al., "Green synthesis of zinc oxide nanoparticles from root extract of *Scutellaria baicalensis* and its photocatalytic degradation activity using methylene blue," *Optik (Stuttg.)*, vol. 184, pp. 324-329, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.051>
- [16] S. Pal, S. Mondal, J. Maity, and R. Mukherjee, "Synthesis and characterization of ZnO nanoparticles using moringa oleifera leaf extract: Investigation of photocatalytic and antibacterial activity," *Int. J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 14, no. 2, pp. 111-119, 2018.



- [17] G. F. T. Andrade, "Tratamiento de aguas residuales mediante la combinación de técnicas avanzadas de oxidación y biofiltros." Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2014.
- [18] V. O. Shikuku and W. N. Nyairo, "Advanced oxidation processes for dye removal from wastewater," in *Impact of textile dyes on public health and the environment*, IGI Global, 2020, pp. 205-238. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0311-9.ch010>
- [19] T. Saison et al., "New insights into BiVO<sub>4</sub> properties as visible light photocatalyst," *J. Phys. Chem. C*, vol. 119, no. 23, pp. 12967-12977, 2015. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b01468>
- [20] S. A. Younis and K.-H. Kim, "Heterogeneous photocatalysis scalability for environmental remediation: Opportunities and challenges," *Catalysts*, vol. 10, no. 10, p. 1109, 2020. <https://doi.org/10.3390/catal10101109>
- [21] E. A. Salas Espinosa, "Degradación de ácido 2, 4-diclorofenoxiacético por fotocatalisis heterogénea solar utilizando ZnO dopado con Co." Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017.
- [22] N. Gerasymenko, "Fotodegradación de azul de metileno mediante compositos de TiO<sub>2</sub>-SnS<sub>2</sub>." Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2014.
- [23] R. Portela, *Eliminación fotocatalítica de H<sub>2</sub>S en aire mediante TiO<sub>2</sub> soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A. (Tesis doctoral)*. Chile: Universidad de Santiago de Compostela, 2008.
- [24] F. Davar, A. Majedi, and A. Mirzaei, "Green synthesis of ZnO nanoparticles and its application in the degradation of some dyes," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 98, no. 6, pp. 1739-1746, 2015. <https://doi.org/10.1111/jace.13467>
- [25] J. Fowsiya, G. Madhumitha, N. A. Al-Dhabi, and M. V. Arasu, "Photocatalytic degradation of Congo red using Carissa edulis extract capped zinc oxide nanoparticles," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 162, pp. 395-401, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.07.011>
- [26] E. S. Mehr, M. Sorbiun, A. Ramazani, and S. T. Fardood, "Plant-mediated synthesis of zinc oxide and copper oxide nanoparticles by using ferulago angulata (schlecht) boiss extract and comparison of their photocatalytic degradation of Rhodamine B (RhB) under visible light irradiation," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 1333-1340, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-8039-3>
- [27] O. J. Nava et al., "Fruit peel extract mediated green synthesis of zinc oxide nanoparticles," *J. Mol. Struct.*, vol. 1147, pp. 1-6, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.06.078>
- [28] M. Shabaani, S. Rahaiee, M. Zare, and S. M. Jafari, "Green synthesis of ZnO nanoparticles using loquat seed extract; Biological functions and photocatalytic degradation properties," *LWT*, vol. 134, p. 110133, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110133>
- [29] S. M. T. H. Moghaddas, B. Elahi, and V. Javanbakht, "Biosynthesis of pure zinc oxide nanoparticles using Quince seed mucilage for photocatalytic dye degradation," *J. Alloys Compd.*, vol. 821, p. 153519, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153519>
- [30] M. Golmohammadi, M. Honarmand, and S. Ghanbari, "A green approach to synthesis of ZnO nanoparticles using jujube fruit extract and their application in photocatalytic degradation of organic dyes," *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 229, p. 117961, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117961>
- [31] A. R. Prasad, J. Garvasis, S. K. Oruvil, and A. Joseph, "Bio-inspired green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Abelmoschus esculentus mucilage and selective degradation of cationic dye pollutants," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 127, pp. 265-274, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jpss.2019.01.003>



[32] J. Lu et al., "Photocatalytic degradation of methylene blue using biosynthesized zinc oxide nanoparticles from bark extract of *Kalopanax septemlobus*," *Optik (Stuttg.)*, vol. 182, pp. 980-985, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.12.016>

[33] Z. U. H. Khan et al., "Greener synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Trianthema portulacastrum* extract and evaluation of its photocatalytic and biological applications," *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 192, pp. 147-157, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.01.013>

[34] M. R. A. Kumar et al., "Evaluation of bi-functional applications of ZnO nanoparticles prepared by green and chemical methods," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 6, p. 103468, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103468>

[35] Y. C. Liu et al., "Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles by one-pot green synthesis using fruit extract of *Amomum longiligulare* and its activity as a photocatalyst," *Optik (Stuttg.)*, vol. 218, p. 165245, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165245>

[36] E. J. Rupa, G. Anandapadmanaban, R. Mathiyalagan, and D.-C. Yang, "Synthesis of zinc oxide nanoparticles from immature fruits of *Rubus coreanus* and its catalytic activity for degradation of industrial dye," *Optik (Stuttg.)*, vol. 172, pp. 1179-1186, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.07.115>

[37] K. M. Sandeep, S. Bhat, and S. M. Dharmaprakash, "Structural, optical, and LED characteristics of ZnO and Al doped ZnO thin films," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 104, pp. 36-44, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2017.01.003>

[38] J. Varghese and R. Vinodkumar, "Effect of CuO on the photoluminescence quenching and photocatalytic activity of ZnO multilayered thin films prepared by sol-gel spin coating technique," *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 10, p. 106405, 2019.

<https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab3596>

[39] H. Çolak and E. Karaköse, "Green synthesis and characterization of nanostructured ZnO thin films using *Citrus aurantifolia* (lemon) peel extract by spin-coating method," *J. Alloys Compd.*, vol. 690, pp. 658-662, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.090>

[40] S. Wilson, B. Olusola, O. James, Y. Kolawole, S. Oyeshola, and H. Olayinka, "Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using bashful (*Mimosa pudica*), leaf extract : a precursor for organic electronics applications," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 1-8, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s42452-020-2127-3>

[41] I. O. P. C. Series and M. Science, "Green Synthesis, characterization of Zinc oxide nanoparticles using *Chromolaena odorata* extract and evaluation of its properties for photoanode of solar cells," 2020.

[42] A. Durmuş, H. Çolak, and E. Karaköse, "Production and examination of ZnO thin film for first time using green synthesized method from aqueous *Citrus reticulata* peel extract," *J. Alloys Compd.*, vol. 809, p. 151813, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.151813>

[43] M. Bakayoko et al., "Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) in powder and in thin film using corn husk extract via green chemistry," *MRS Adv.*, vol. 5, no. 21, pp. 1083-1093, 2020.

<https://doi.org/10.1557/adv.2020.98>

[44] A. El Golli, M. Fendrich, N. Bazzanella, C. Dridi, A. Miotello, and M. Orlandi, "Wastewater remediation with ZnO photocatalysts: Green synthesis and solar concentration as an economically and environmentally viable route to application," *J. Environ. Manage.*, vol. 286, p. 112226, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112226>

[45] A. Taşdemir et al., "A green approach for the preparation of nanostructured zinc oxide: Characterization and promising antibacterial



behaviour," Ceram. Int., 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.273>

[46] A. A. Barzinjy, S. M. Hamad, M. M. Esmael, S. K. Aydin, and F. H. S. Hussain, "Biosynthesis and characterisation of zinc oxide nanoparticles from Punica granatum (pomegranate) juice extract and its application in thin films preparation by spin-coating method," Micro Nano Lett., vol. 15, no. 6, pp. 415-420, 2020.  
<https://doi.org/10.1049/mnl.2019.0501>

[47] K. Kaviyarasu et al., "Elucidation of photocatalysis, photoluminescence and antibacterial studies of ZnO thin films by spin coating method," J. Photochem. Photobiol. B Biol., vol. 173, pp. 466-475, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.06.026>

Derechos de Autor (c) 2021 Manuel de Jesús Rodríguez Ortiz, Ricardo Hoffmann Valencia, Guillermo Amaya Parra, Priscy Alfredo Luque Morales



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Solid state resonant circuits and wireless electrical power propagation for mobile devices applications

## *Circuitos resonantes de estado sólido y propagación de energía eléctrica inalámbrica para aplicaciones de dispositivos móviles*

Sergio Orendain-Castro <sup>1</sup>, Eduardo Murillo-Bracamontes <sup>2</sup>, Oscar Edel Contreras-López<sup>2</sup>,  
Alberto Hernández-Maldonado <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México

<sup>2</sup>Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ensenada, Baja California, México

**Corresponding author:** Alberto Hernández Maldonado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California. Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. E-mail: [hernandez.alberto@uabc.edu.mx](mailto:hernandez.alberto@uabc.edu.mx), ORCID: 0000-0002-9768-4060.

**Received:** August 20, 2021

**Accepted:** October 19, 2021

**Published:** November 1, 2021

**Abstract.** - In this work, theoretical and experimental results of solid-state resonant circuits for the transmission and reception of wireless electrical energy, for applications in mobile devices are presented. Analytical expressions are found to calculate the voltage range as a function of the distance between the emitter and the load, as well as the current at the front end of an electromagnetic wave receiver. These expressions show the parameters to be varied to achieve a greater range in the transmission of wireless electrical energy. The transmitted voltage and current are measured by an electromagnetic wave receiver and compared with theoretical values, finding an excellent correspondence between the two.

**Keywords:** Wireless energy; Resonant circuits; Power propagation.

**Resumen.** - En el presente trabajo se presentan resultados teóricos y experimentales de circuitos resonantes de estado sólido para la transmisión y recepción de energía eléctrica inalámbrica, para aplicaciones en dispositivos móviles. Se encuentran expresiones analíticas para calcular el alcance de voltaje en función de la distancia entre el emisor y la carga, así como la corriente en el extremo frontal de un receptor de ondas electromagnéticas. Estas expresiones muestran los parámetros a variar para lograr un mayor alcance en la transmisión de energía eléctrica inalámbrica. La tensión y la corriente transmitidas se miden mediante un receptor de ondas electromagnéticas y se comparan con valores teóricos, encontrando una excelente correspondencia entre ambos.

**Palabras clave:** Energía inalámbrica; Circuitos resonantes; Propagación de energía.



## 1. Introducción

As is well known, the transmission of electrical energy is carried out through the use of electrical wiring, however, recent technological advances in the area of communications have motivated people to look for different ways of transmitting energy [1]. An example of this, are the cellular charging systems by magnetic induction [2, 3].

The transfer of electrical energy by magnetic induction through radio waves, was a problem initially raised by Nikola Tesla [4]. He worked on this problem, with the purpose of achieving a distribution of electricity wirelessly, over long distances.

We can classify wireless energy transfer systems into two types, inductive power transfer and magnetic resonance coupling and Near Field [5]. The inductive power transfer system uses a pair of coupled coils, at the transmitting side, an alternating current flow through the coil, generating a magnetic field, a second coil is used to receive the magnetic field and generate a current for energy storage. A magnetic resonant coupling system uses a pair of coupled coils with additional capacitance, which makes that the transmitter and the receiver have the same resonant frequency, which increases the efficiency and the transmission distance [6, 7].

Near Field Communication (NFC) is a technology that uses an inductive coupling technique oriented for mobile smart phone and operates at 13.56 MHz; it works via magnetic field induction and can transmit information in short distances up to a maximum rate of 424 Kbit per second. NFC systems are oriented to data exchange applications and usually used in mobile phones [8].

Some research from the Massachusetts Institute of Technology have worked in wireless power transfer because power cables reduce and limit the mobility of electronic devices. These investigations are based on magnetic induction techniques using new ring-shaped solenoid geometries. In these studies, it is possible to transfer electricity wirelessly, turning on a 60 Watts bulb, located 2 meters away, with an efficiency of 40% [9].

Some works have focused on the wireless transmission of electrical energy, using magnetically coupled aluminum and copper rings, achieving an efficiency of between 7% and 10% [10]. In these studies, the energy is used in the form of electromagnetic waves, using an emitter and receiver ring with resistive loads.

A related work demonstrated that the energy range of a wireless transmitter can be increased, by using a system of rings located at a distance of 0.4 meters between them, achieving a power of 18 watts when a lamp is connected at 2.1 m of the transmitter ring system [11]. The system has an efficiency of 14.43% at 10 mm of distance.

A method of wireless power transfer technique is called Strongly Coupled Magnetic Resonance (SCMR) which take the advantage of electromagnetic resonance to efficiently transfer power over mid-range distances. A novel approach is the use of a wideband SCMR to mitigate the drop of efficiency caused by the shift of the resonance frequency [12]. However, most of the research in SCMR is at the simulation stage with a limited number of experimental results [13]. Although with these devices great range in the transmission of electric energy is achieved, they are macroscopic devices and are not viable, for example, to be used to charge mobile devices.



In this work, a magnetic resonant coupling system using high frequency energy is presented. The system was designed to increase the signal range by reducing the receiver energy losses and use commercial electronic components to reduce the size of the circuit and allow its implementation in a mobile device. Resonant

circuits applied to the transmission and reception of wireless electrical energy are analyzed theoretically and experimentally. The implemented circuit has the advantage of use commercial components that can be implemented in a printed circuit board in SMT package. Figure 1 shows the scheme of wireless power transfer system with magnetic coupling.

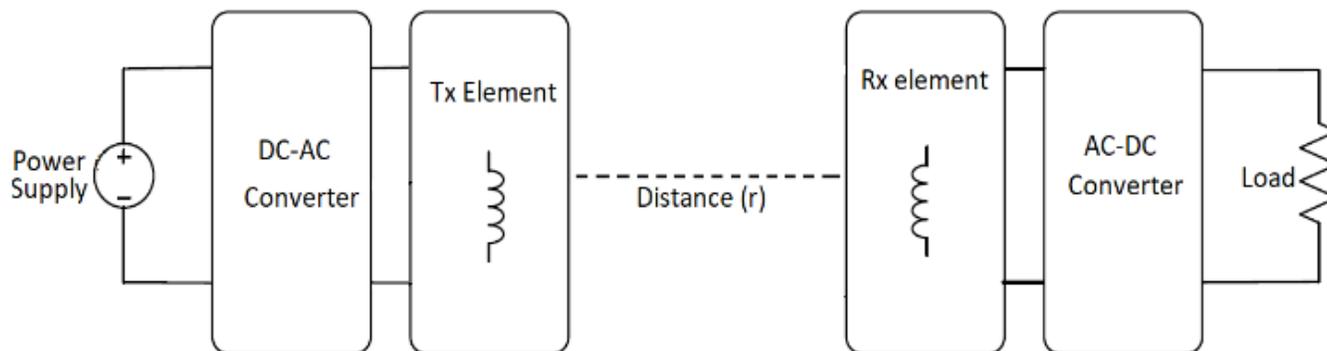


Figure 1. Scheme of wireless power transfer with magnetic coupling.

This article is structured as follows. In section 2, the resonant solid-state device is presented. In section 3, the design of an electromagnetic wave receiver is shown. In section 4, a relationship of the voltage received by the receiver and the transmitting range of the emitter is presented. In section 5, an analysis of the current is presented and, finally, the conclusions are shown in section 6.

## 2. Resonant solid state device

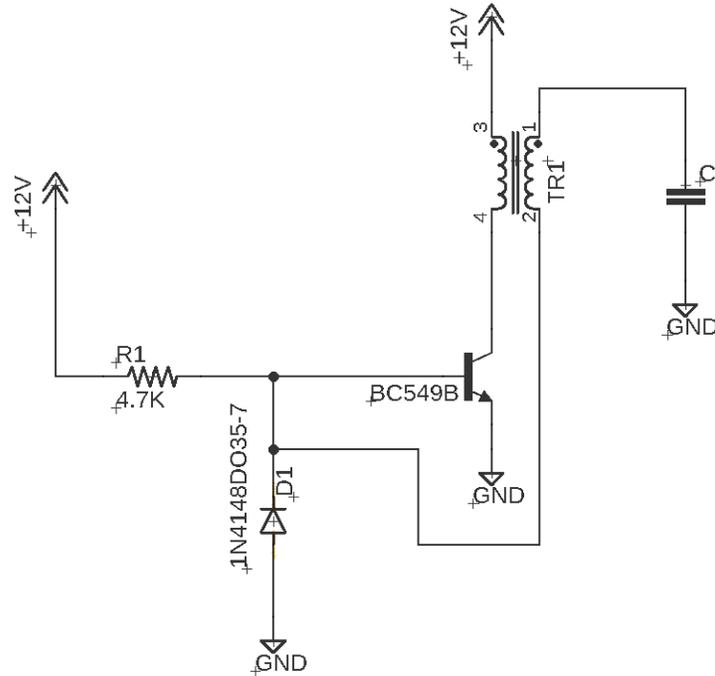
### 2.1. Primary winding analysis

In this section, a resonant solid-state device is analyzed. Some results and simulations corresponding to its operation are presented. Figure 2 shows a schematic diagram of the device. Its operation is based on the transistor, in switch configuration, working as a high frequency function generator, which transforms the primary winding (PW) and secondary winding (SW) in an RLC circuit, with a

resonance frequency tuned to the corresponding transistor resonance.

The circuit of Figure 2 is a resonant circuit. When the circuit is powered up, current flow to the base terminal of the transistor through R1. In this condition the transistor is activated and the current start to flow to the PW, producing a magnetic flux which causes a high voltage in the SW since it has more turns than the PW. As the current in the PW increases, the transistor gets into saturated region and due to both the PW and R1 are connected to the +12V, all the current flow through PW causing a current drop through R1 and this condition turn off the transistor. The current start to flow again to the base terminal of the transistor and this cycle is repeated.

The SW, as well as the PW, when a high-frequency signal is applied, shows a parasitic capacitance. Due to the geometry of the winding, the PW and SW have a parasitic capacitance  $C_1$  and  $C_2$  respectively.



**Figure 2.** Resonant solid-state device.

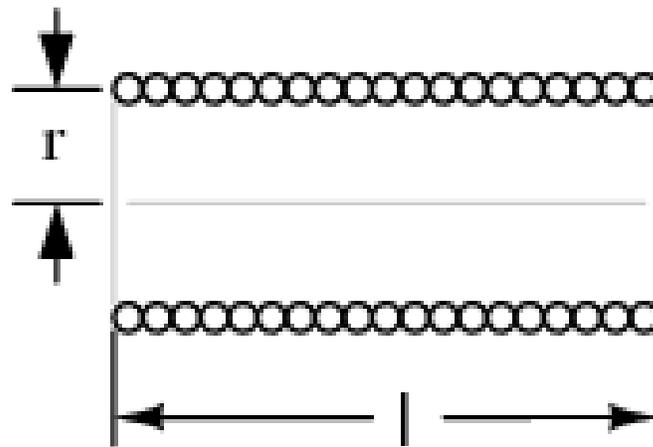
The coil on the left side of the device corresponds to the PW, with a winding length  $l = 0.556$  m. The height  $h$  of the primary winding is  $6.6 \times 10^{-3}$  m and the number of turns is 5.

The wire diameter of the winding is  $6.438 \times 10^{-4}$  m. It should be noted that this diameter does not

include insulation. With insulation, its diameter is  $1.32 \times 10^{-3}$  m.

The radius  $r_l$  of the PW core is  $1.27 \times 10^{-2}$  m.

On the other hand, the Wheeler formula, provides a way to calculate the inductance in windings with air core and circular geometry [14]. This formula is given by,



**Figure 3.** Physical model of a coil



$$L = \frac{0.394 r^2 N^2}{9 r + 10 l}, \quad (1)$$

where  $L$  represents the inductance of the coil,  $r$  corresponds to the radius of the coil,  $l$  represents the length and  $N$  is the number of turns of the winding. These parameters are represented in figure 3.

Using the Wheeler formula, Eq. (1), the inductance  $L_1$  corresponding to the PW is  $0.88 \mu H$ .

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (2)$$

The value minimum of  $Z$ , is obtained when  $X_L = X_C$ .

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (3)$$

where  $\omega_0$  corresponds to the resonant frequency in  $rad/s$ , and  $\omega_0 = 2\pi F_0$ , resulting the following relation

From the previous results, and through Eq. (4), the resonance frequency  $F_0$  of PW is  $3.247 MHz$ .

The PW shows a resonance by itself, and implicitly presents a capacitance when a high frequency is applied. This parasitic capacitance  $C_1$  corresponds to a value of  $2.71 nF$ .

On the other hand, the impedance  $Z$  for our RLC circuit, is defined by,

With  $X_L = \omega L$  and  $X_C = 1/\omega C$ .

By matching the reactances as a function of the frequencies, the following expression results,

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

This frequency was confirmed by measuring it with an oscilloscope as shown in figure 4.

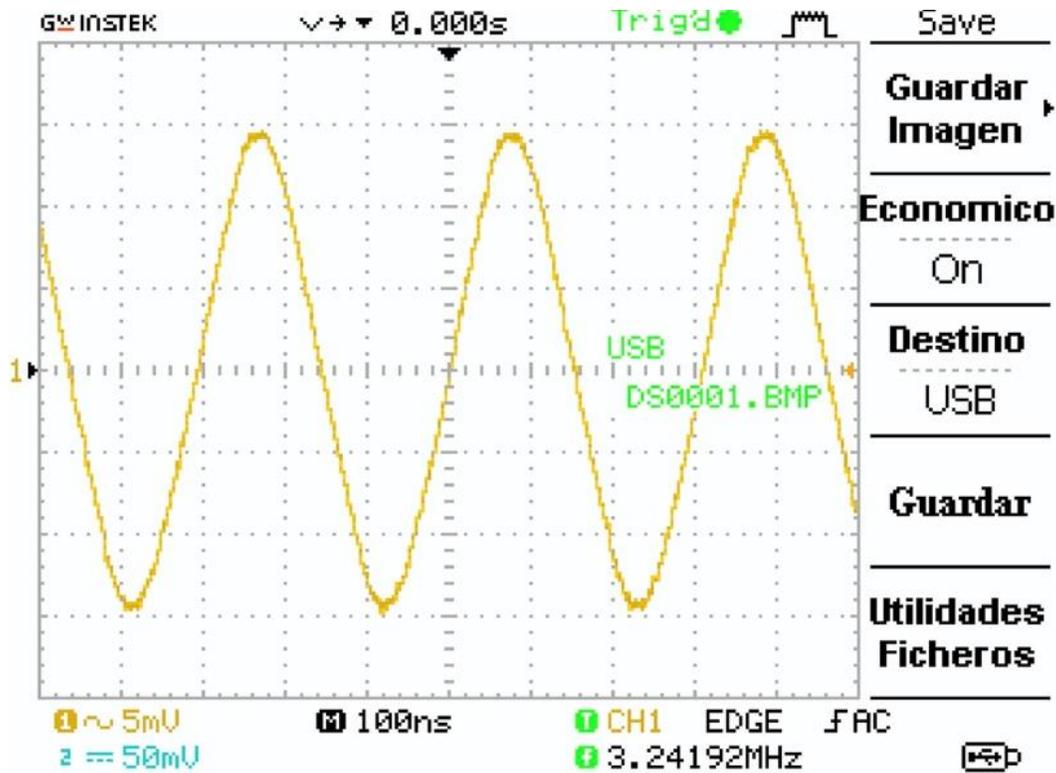


Figure 4. Measurement of the resonance frequency using an oscilloscope.

## 2.2 Secondary winding analysis

The winding shown on the right side of the device of Figure 2, corresponds to the SW. This winding has a radius of  $1.275 \times 10^{-4}$  m, a cross section of  $5.10 \times 10^{-8} \text{ m}^2$  and a winding length of 18.04 m. Its resistance is 6.0506  $\Omega$ , and the height  $h_2$  is,  $5.8 \times 10^{-2}$  m.

On the other hand, the number of turns of the SW is 212. With the previous data and using the Eq. (1), we calculate the inductance  $L_2$  of SW, yielding a value of 411.36  $\mu\text{H}$ .

Through Eq. (4) and using the resonance frequency  $F_0$ , as well as the inductance  $L_2$ , the calculated parasitic capacitance is 5.8405 pF.

## 2.3 Potential energy and maximum voltage of secondary winding

The SW has a capacitance at high frequency (parasitic capacitance) and also a capacitance between each turn (intrinsic capacitance). Using the model of a cylindrical solenoid, and the equation of Medhurst [12], which gives a capacitance per unit of length. We can calculate the capacitance  $C_{L2}$  for the SW.

$$C_{L2} = \left( 0.29 h_2 + 0.41 r_2 + 1.94 \sqrt{\frac{r_2^3}{h_2}} \right) \text{pF/in.} \quad (5)$$

Substituting the corresponding values in the previous equation, gives a value of  $C_{L2} = 1.32 \text{ pF}$ .

The total capacitance of the SW can be obtained as the difference of the capacitance  $C_2$  and  $C_{L2}$ , which is called  $C_R$  or real capacitance.  $C_{L2}$  is present even when no current is flowing in SW. The capacitance per unit length without load, is as follow,



$$C_R = C_2 - C_{L2} = 4.52 \text{ pF}. \quad (6)$$

When a load is placed on the SW, the resulting capacitance per unit of length  $C_D$ , can be calculate with the following equation.

$$C_D = 1.4 \left( 1.2781 - \frac{D_2}{D_1} \right) \sqrt{\pi D_2 (D_1 - D_2)} \text{ pF/in.} \quad (7)$$

The winding diameters of the core of PW and SW are  $D_1 = 1.0 \text{ in}$  and  $D_2 = 0.01 \text{ in}$  respectively. Using the Eq (7),  $C_D$  is  $0.31 \text{ pF}$ . When the load is placed on the SW, a discharge occurs on capacitor  $C_D$ , and the capacitance decreases, while the voltage increases.

In order to know the maximum voltage on the extreme of the SW, it is necessary to know the stored energy in the winding, so the input voltage in the PW is also required.

The equation that defines the energy with respect to voltage and capacitance, for the PW, is written as follows,

$$E_{PW} = \frac{1}{2} C_1 V_{PW}^2. \quad (8)$$

Substituting the corresponding values in Eq. (8), the resulting energy in the PW corresponds to  $1.91 \times 10^{-7} \text{ J}$ . Assuming there is no loss of energy transfer between the PW and the SW, we can say that  $E_{PW} = E_{SW}$ , where  $E_{SW}$  is the energy of the SW.

As the load resistance of cooper makes contact with the tip of the SW, the open circuit voltage  $V_{OC}$  increases. To calculate this voltage, we can use the Eq (8) for the SW, resulting,

$$V_{OC} = \sqrt{\frac{2E_{SW}}{C_D}} = 1110.7 \text{ V}. \quad (9)$$

The real voltage  $V_{OR}$  of the SW without load, can be calculated, using the real capacitance  $C_R$ , which is equal to  $290.7 \text{ V}$ .

### 3. Electromagnetic wave receiver

A good receiver design is crucial to improve the system energy transfer. Figure 4 shows an electromagnetic wave receiver (EMWR), designed to measure the resonance frequency and the voltage  $V_r$ , at a distance  $r$  from the extreme of the SW, as well as the power in that distance. Also, the EMWR receive the electromagnetic waves emitted by the SW, which go through a process of amplification and decoding, to convert the resulting electric field  $E_r$ , into a potential  $V_r$ . The EMWR includes a PSoC microcontroller, which is a device with a CPU core and mixed-signal arrays of configurable integrated analog and digital peripherals.

This PSoC microcontroller was configured to acquire the transmitted signal. An analog to digital converter was used to measure the receiver voltage. Also, a comparator was configured to measure the frequency of the signal. An ultrasonic sensor was used to measure automatically the distance between the transmitter and receiver. A display was configured to show the received voltage in SW, the range  $r$  and the frequency. The PSoC microcontroller was also configured to send the received information to a PC with Matlab software to save the data in a log file and plot the corresponding curves. Figure 6 shows the diagram of the PSoC microcontroller and the receiver circuit.

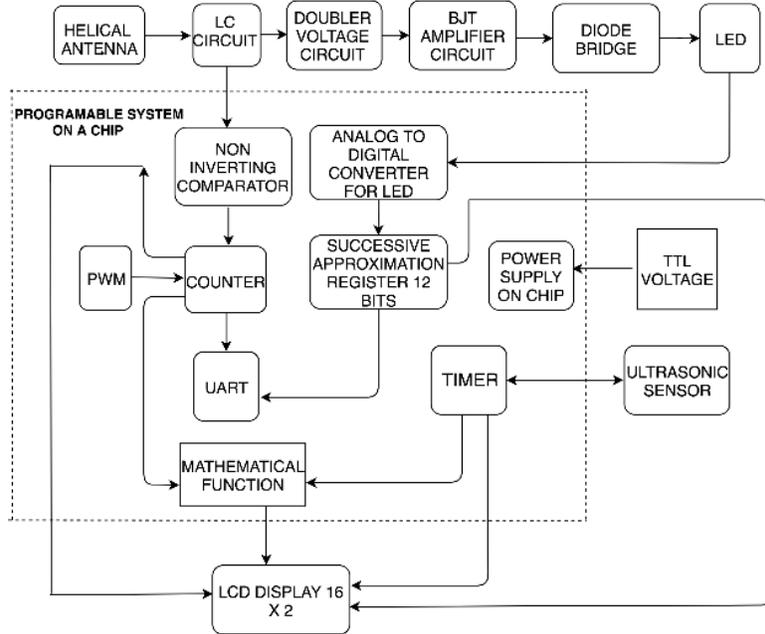


Figure 5. Electromagnetic wave receiver (EMWR).

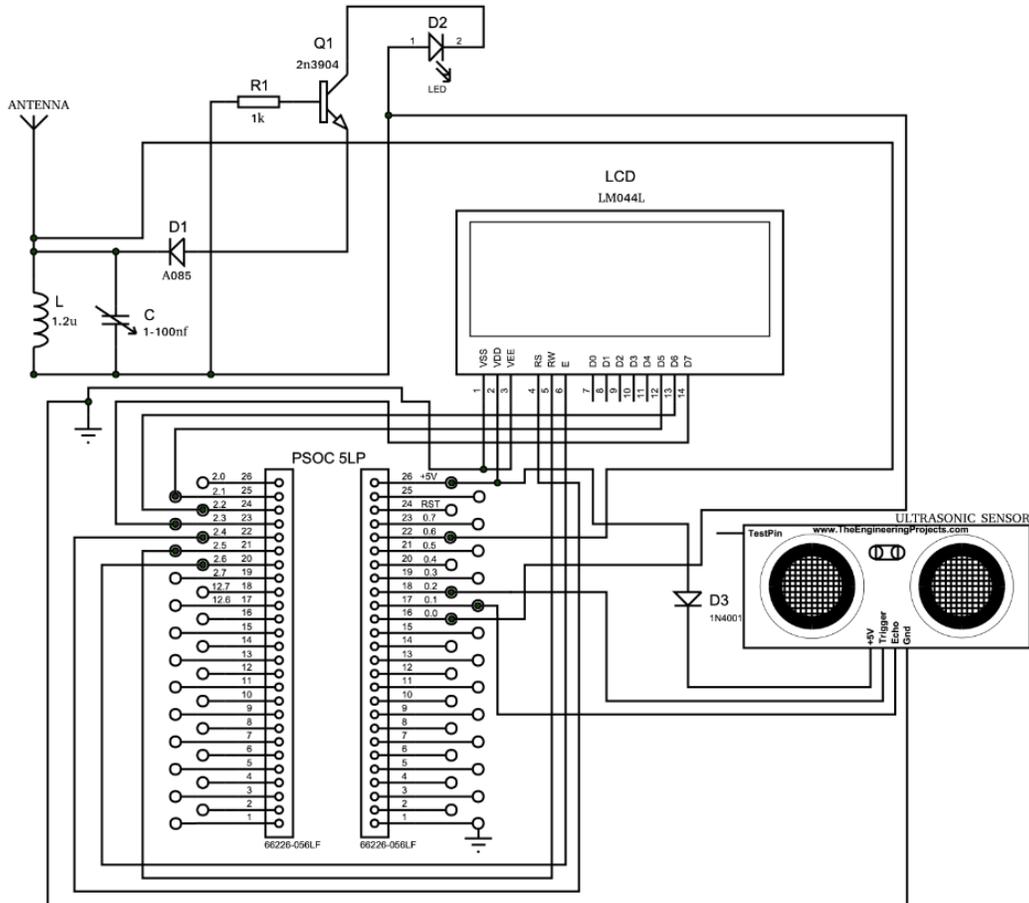


Figure 6. Circuit diagram of the receiver.



#### 4. Secondary winding

In order to perform a quantitative study to know the variation of the voltage corresponding to the SW, as a function of the distance  $r$  regard to the detector.

Using the Gauss theorem, expressed as,

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{Q}{\epsilon_0}. \quad (10)$$

The cylindrical Gaussian surface is represented in figure 7, where  $R$  corresponds to the radius of the SW, and  $r$  corresponds to the radius of the Gaussian surface. We can calculate the electric field  $E$ , at a distance  $r$  from SW.

Let  $ds$  be a differential element of surface, where the electric field  $E$  and this  $ds$  are parallel in the lateral surface, whereas in the upper and lower surfaces, they are perpendicular.

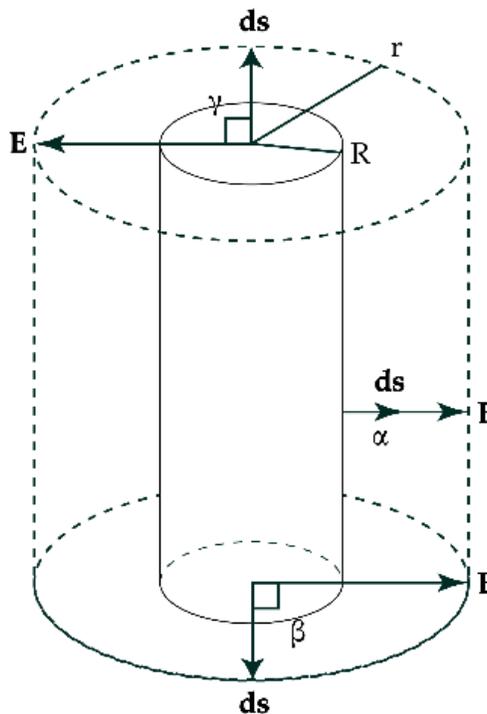


Figure 7. Gaussian surface around the SW.

The angles  $\gamma$  and  $\beta$  in the cylinder caps that form  $E$  and  $ds$  are perpendicular, while  $\alpha$ , corresponding to the angle between  $E$  and  $ds$  of the lateral surface of the cylinder, is zero degrees.

According to Gauss's theorem, for the lower and upper surface, we find that,

$$\oint E ds \cos \beta = \oint E ds \cos \gamma = 0. \quad (11)$$

Therefore, it is shown that the electric field on the upper and lower surface is zero.

On the other hand, for the lateral Gaussian surface

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \oint E ds \cos \alpha. \quad (12)$$

Since the electric field is uniform throughout the lateral periphery of the Gaussian surface,



$$E \oint ds = Es, \quad (13)$$

Where  $s = 2\pi rL$ ,  $L$  corresponds to the height of the cylindrical surface,  $s$ , represents the lateral surface of the cylinder. Thus

$$Es = 2\pi rEL. \quad (14)$$

From eq. (10) results,

$$2\pi rEL = \frac{Q}{\epsilon_0}, \quad (15)$$

where  $Q$  is the total charge of the cylinder.

The SW is formed by a winding that contains multiple turns. These capacitors are in parallel, forming a cylindrical capacitor with a total capacitance  $C$ , which stores a charge that will be proportional to the voltage in the secondary winding  $V_{SW}$ . Using the model to calculate the electric field in a cylindrical capacitor [15].

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}, \quad (16)$$

where  $\epsilon$  and  $L$ , are the permittivity of the insulator and the height the cylinder respectively.

Using the capacitance  $C$  in the equation that defines the charge ( $Q = CV$ ), and the result in

eq. (15), the equation that defines the electric field as a function of distance  $r$  is,

$$E = \frac{\epsilon V_{SW}}{\epsilon_0 r \ln\left(\frac{r}{R}\right)}, \quad (17)$$

where  $\epsilon_0$  is the electric permittivity in vacuum,

On the other hand, to obtain an expression for  $V_2$ , which is the voltage measured by the electromagnetic wave receiver (EMWR), as a function of the distance  $r$ , we use the knowledge the electric field  $E$ , is expressed as the voltage  $V$  divided by the distance  $r$ . In our case,  $r$  expresses the electric field reaching  $E$  in terms of voltage  $V_2$ , processed by the receiver placed at the distance  $r$  of the SW. From the above, and the Eq. (17), the voltage  $V_2$  can be expressed as,

$$V_2 = \frac{\epsilon V_{SW}}{\epsilon_0 \ln\left(\frac{r}{R}\right)}. \quad (18)$$

From Eq. (18) we can obtain an expression to calculate the reaching  $r$  as a function of the transmitting voltage  $V_{SW}$  and the receiving voltage  $V_2$ .

$$r = R e^{\frac{\sigma V_{SW}}{V_2}}, \quad (19)$$

where  $\sigma = \epsilon/\epsilon_0$ .

The figure 8, is a block diagram that represents the SW voltage and EMWR.

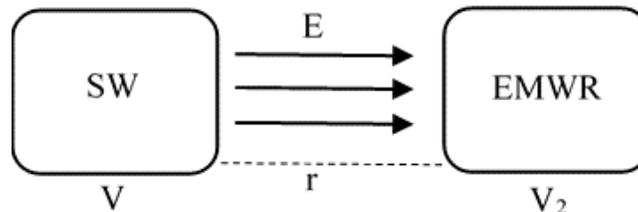


Figure 8. Block diagram of SW and EMWR

To increase the reaching range  $r$ , it is necessary to increase the radius  $R$  of the ES, as well as the electrical permittivity in the insulator and the

number of windings. The Eq. (19) provides us with a nice relation of the relevant parameters of the system to obtain a greater range  $r$  of voltage

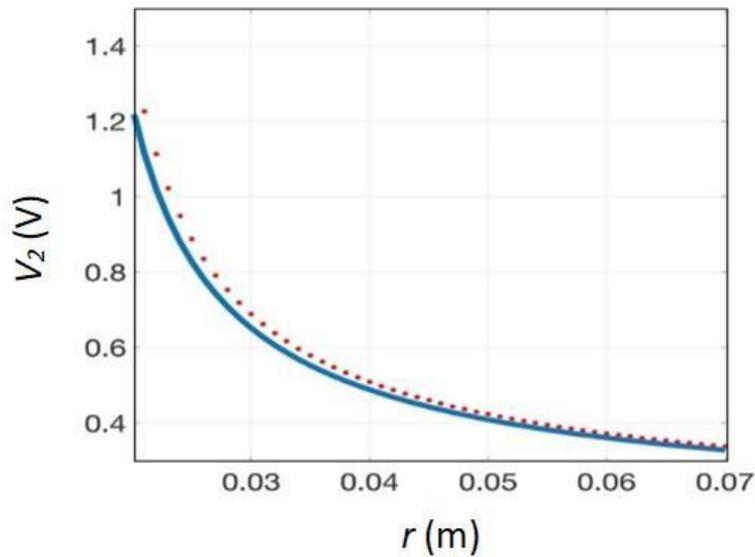


$V_2$ . And corresponds to a one of the principal results of this paper.

From Eq. (19) we note that if the voltage  $V_2$  tends to 0, then  $r$  tends to infinity as is shown in Fig. 8. On the other hand, if  $V_2$  tends to infinity,  $r$  tends to  $R$ , which is an expected result, since the

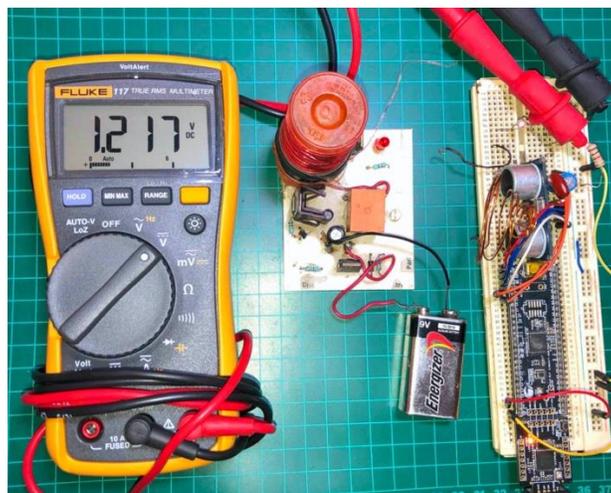
maximum voltage  $V_2$  occurs at the minimum distance, when  $r = R$ .

It is important to highlight that all the parameters of Eq. (18) can be measured, and gives the effective voltage drop  $V_2$ , as a function of distance  $r$ .



**Figure 9.** Voltage  $V_2$  as function of the range  $r$ . The red dotted line corresponds to experimental data. The blue continuous line is obtained theoretically from Eq. (14).

In figure 9, the experimental voltage was obtained in a real-time interface that communicates a PSoC microcontroller and a Matlab script. We can see both experimental and theoretical (Eq. (18)) curves show the same behavior.



**Figure 10.** From left to right, is shown multimeter, SW and EMWR



In figure 10, is observed that the maximum voltage measured in the EMWR is 1.217 V. This is close to theoretical value given by Eq. (18).

### 5. Electrical current analysis

Knowing that the resonance frequency  $F_0$  of the ES, corresponds to 3.25 MHz, the coil and capacitor of the EMWR are 411.3  $\mu$ H and 5.8 pF respectively, and that these form a resonant LC circuit, we can obtain the current in the LC circuit.

In resonance, it can be calculated the parameters of a free LC oscillator, without using a power supply, using the simple equation,

$$L \frac{di}{dt} + \frac{Q}{C} = 0. \tag{20}$$

It is found that the charge on the capacitor is,

$$Q = Q_{max} \cos \frac{t}{\sqrt{LC}}. \tag{21}$$

While the current in the LC oscillator corresponds to,

$$i = -\frac{1}{\sqrt{LC}} Q_{max} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}}. \tag{22}$$

In this way, the amplitude of the maximum current of the LC circuit it is obtained,

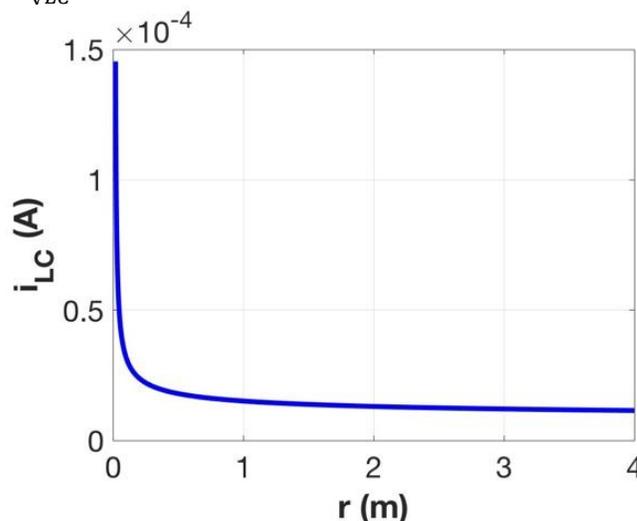
$$i_{LC} = \frac{1}{\sqrt{LC}} Q_{max}. \tag{23}$$

We know that the capacitance is given by the reason of the charge and the voltage, the current of the LC circuit as function of the ES voltage is obtained, replacing L and C by  $L_{EMWR}$  and  $C_{EMWR}$ ,  $i_{LC}$  leads to,

$$i_{LC} = \frac{C_{EMWR} V_2}{\sqrt{L_{EMWR} C_{EMWR}}}. \tag{24}$$

Substituting the values of  $C_{EMWR}$ ,  $V_2$  and  $L_{EMWR}$ , in the previous equation, we obtain the value of  $i_{LC} = 158 \mu$ A, which is the maximum rms current that goes through  $L_{EMWR}$  or  $C_{EMWR}$ . To enhance the current in the EMWR, is necessary to increase  $V_2$  and  $C_{EMWR}$ , nevertheless, by varying  $C_{EMWR}$ , the ES will no longer be in resonance with the EMWR, unless in both systems increase the capacitance proportionally.

In figure 11, the measured current  $i_{LC}$  is plotted as function of the range  $r$ . We can see a maximum initial value of 149  $\mu$ A, which is near than the calculated value.

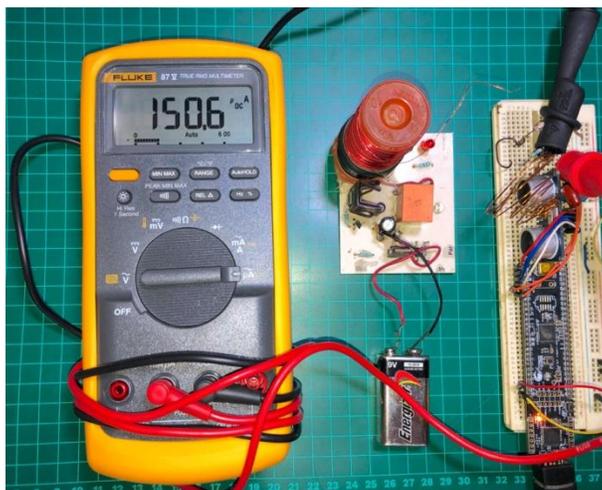


**Figure 11.** Total current passing through the coil and the capacitor of the electromagnetic wave receiver



Unlike the measurement presented in figure 10, the current measurement is carried out using a high resolution multimeter, this because the current received by the EMWR is in the order of micro-Ampere. If you want to measurement the

current with a low-resolution multimeter you will not be able measure it. The measuring instrument used was the Fluke 87. The measurement is shown in figure 11.



**Figure 11.** Measurement of current in the EMWR.

The value of 150.06  $\mu\text{A}$  is close to the theoretical result obtained in the Eq. (24).

## 6. Conclusions

In this work, a theoretical framework was implemented to analyze a solid-state resonant circuit, based on a designed device for transmitting and receiving wireless electrical energy. Both, theoretical and experimental results were obtained for the energy transmission and reception of energy. Also, analytical expression was obtained to calculate the effective voltage as a function of the distance from the secondary coil to the receiver. This expression allows us to explore the parameter necessary to achieve a greater range  $V_2$ .

Using the PSoC microcontroller coupled to the electromagnetic waves receiver to acquire the received voltage and distance. A visual interface was designed in real time to plot the behavior of

the effective voltage that the SW emits, with respect to the distance of the receiver, observing a concordance between the theoretical and experimental value. It was demonstrated, that the voltage at the receiver, decreases exponentially as function of the range.

The current in the front end of the electromagnetic wave receiver was calculated, it also shows an exponential decay as a function of the range.

We obtained that for increase the range, it is necessary to increase the radius  $R$ , as well as the electrical permittivity in the insulator and the number of windings, by varying both parameters, it is observed experimentally that the range increases exponentially.

It was shown that the resonance frequency of the secondary winding is constant, regardless of a load.



The advantage of our results compared to others reported in the, is that although exist devices great range in the transmission of electric energy is achieved, they are macroscopic devices and are not viable, for example, to be used to charge mobile devices.

While the system presented here was designed to increase the signal range by reducing the receiver energy losses and use commercial electronic components to reduce the size of the circuit and allow its implementation in a mobile device, as is the case of the device shown here, which is small in size and can be used in recharging this purpose.

### 7. Acknowledgments

The authors acknowledge Salvador Fierro for his support in the design of Fig. 7. Also, Alberto Hernández thanks the Center for Nanosciences and Nanotechnology for their support during his sabbatical stay in this institution.

### 8. Authorship acknowledgment

*Sergo Orendain castro:* Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Análisis de datos; Borrador original. *Eduardo Murillo Bracamontes:* Conceptualización; Ideas; Investigación; Análisis de datos; Escritura. *Oscar Edel Contreras López:* Adquisición de fondos y Administración de proyecto. *Alberto Hernández Maldonado:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Escritura; Borrador original; Revisión y edición; Administración de proyecto.

### References

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications," IEEE Commun. Surv. Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1413-1452, 2016. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2499783>.
- [2] K. H. Yi, "Output voltage analysis of inductive wireless power transfer with series Lc and Llc resonance operations depending on coupling condition," Electron., vol. 9, no. 4, 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9040592>.
- [3] P.S. Riehl et al., "Wireless power systems for mobile devices supporting inductive and resonant operating modes," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 63, no. 3, pp. 780-790, 2015. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2398413>.
- [4] N. Tesla, "Experiments with alternate current of very high frequency and their application to methods of artificial illumination," Columbia Coll., pp. 267-319, 1891. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1891.5570149>.
- [5] S. K. Oruganti and F. Bien, "Investigation of Near-Field Wireless Energy Transfer for Through Metal-Wall Applications," 2014 IEEE Wirel. Power Transf. Conf., pp. 247-250, 2014. <https://doi.org/10.1109/WPT.2014.6839573>
- [6] S. Kim, Y. Lim, and S. Lee, "Magnetic Resonant Coupling Based Wireless Power Transfer System with In-Band Communication," no. May 2015, 2013. <https://doi.org/10.5573/JSTS.2013.13.6.562>
- [7] R. Kerid and H. Bourouina, "Analysis of Wireless Power Transfer System with New Resonant Circuit for High Efficiency Using Perforated Capacitors," Arab. J. Sci. Eng., vol.



44, no. 3, pp. 2445-2451, 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s13369-018-3579-2>.

[8] P. Sittithai, K. Phaebua, T. Lertwiriayaprapa, and P. Akkaraekthalin, "Magnetic field shaping technique for HF-RFID and NFC systems," *Radioengineering*, vol. 27, no. 1, pp. 121-128, 2019. <https://doi.org/10.13164/re.2019.0121>

[9] R. A. Moffatt, "Wireless Transfer of Electric Power," Massachusetts Institute of Technology, 2009.

[10] T. Supriyanto, A. Wulandari, and T. Firmansyah, "Design and Comparison Wireless Power Transfer Base on Copper (Cu) and Aluminium (Al) Rings Loop Magnetic Coupling," no. January 2016, pp. 6-10, 2017. <https://doi.org/10.18178/IJIEE.2016.6.2.605>

[11] C. K. Lee, W. X. Zhong, and S. Y. R. Hui, "Effects of Magnetic Coupling of Nonadjacent Resonators on Wireless Power Domino-Resonator Systems," vol. 27, no. 4, pp. 1905-1916, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2169460>

[12] W. Zhou, S. Sandeep, P. Wu, P. Yang, W. Yu, and S. Y. Huang, "A wideband strongly coupled magnetic resonance wireless power transfer system and its circuit analysis," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 28, no. 12, pp. 1152-1154, 2018. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2876767>

[13] C. M. W. Basnayaka, D. N. K. Jayakody, A. Sharma, H.-C. Wang, and P. Muthuchidambaranathan, "Performance Study of Strongly Coupled Magnetic Resonance," 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1908.02541>.

[14] D. Knight, "The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods," no. May. 2016.

[15] P. Azimi and H. Golnabi, "Precise Formulation of Electrical capacitance for a Cylindrical Capacitive Sensor," *J. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 8, pp. 1556-1561, 2009. <https://doi.org/10.3923/jas.2009.1556.1561>

[16] H. Wheeler, "Formulas the Skin Effect," *Proc. IRE*, pp. 412-424, 1942. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1942.232015>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Los modelos de escritura gráfico identificativos con hegemonía socio-visual en la identificación de la arquitectura en Tampico (1914-1930)

## *The graphic identifying writing models with socio-visual hegemony in the identification of architecture in Tampico (1914-1930)*

Rebeca Isadora Lozano Castro 

Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Tampico Madero S/N, Universidad Poniente, 89109 Tampico, Tamaulipas, México.

Email: [rilozano@uat.edu.mx](mailto:rilozano@uat.edu.mx). ORCID: 0000-0003-4396-5833.

**Recibido:** 01 de Mayo del 2021    **Aceptado:** 04 de Noviembre del 2021    **Publicado:** 12 de Noviembre del 2021

**Resumen.-** La presente investigación explora la capacidad de los modelos de escritura gráficos identificativos, inscripciones o símbolos identificatorios construidos, como uno de los principales instrumentos y medios con los que contaron los arquitectos para penetrar el complejo mosaico cultural en México, dispuestos para identificación de fachadas en edificios de 1914 a 1930; como expresión visual de manifestaciones culturales extranjeras que se hicieron propias e identitarias en la sociedad tampiqueña. Esos objetos de comunicación materializada son referentes del pensamiento tampiqueño moderno y actuaron como portavoces de las ideas políticas y sociales de la clase dominante (burguesa) interesada en la nueva corriente modernizadora progresista que llegó al país para inicios del siglo XX. Los modelos de escritura fueron auspiciados por ciertos grupos de poder locales que se vincularon con el transcurrir cultural, económico y político, y funcionaron como dispositivos visuales discursivo y representativos gráficamente; que fueron, principalmente, de orígenes extranjeros difusores de nuevos códigos de inclusión y exclusión social con la finalidad de ser modelos de civilidad. El objetivo de esta investigación es hacer una revisión sobre el estado del arte de la hegemonía socio-visual en los modelos de escritura y su relación con esa cultura. En consideración de John B. Thompson (2002) [1] los medios de comunicación transforman potencialmente la cultura y la vida cotidiana de las sociedades sobre las que actúan. El método inicial se orientó en identificar el corpus de esos (49) objetos, su estudio textual y argumental con una exploración descriptiva e interpretativa a partir de la mirada del diseño. Para ello, se consideraron autores como R. Williams (1981) [2], S. Hall (1984) [3] y Verón (2005) [4], mientras que la perspectiva metodológica para pensar la articulación entre hegemonía socio-visual y representación gráfica fue la hermenéutica profunda propuesta por Thompson con análisis discursivo socio-histórico. Esta investigación de enfoque cualitativo-interpretativo considera que los modelos de escritura sostuvieron imaginarios de progreso, y este registro gráfico no tematizado permitió vincular la dimensión cultural y visual con la dimensión política estructural; para luego identificar el diálogo entre esas dos dimensiones. Lo que resultó demostrable a través del análisis empírico historiográfico realizado en modelos de escritura y la comprensión clara del concepto de hegemonía socio-visual.

**Palabras clave:** Hegemonía socio-visual; Modelos de escritura; Identificación social.



**Abstract.** - *This research explores the capacity of the identifying graphic writing models, inscriptions or identifying symbols built, as one of the main instruments and means that architects had to penetrate the complex cultural mosaic in Mexico, arranged to identify building facades. from 1914 to 1930; as a visual expression of foreign cultural manifestations that became their own and identity in Tampico society. These objects of materialized communication are referents of modern Tampico thought and acted as spokesmen for the political and social ideas of the ruling class (bourgeoisie) interested in the new progressive modernizing current that arrived in the country at the beginning of the 20th century. The writing models were sponsored by certain local power groups that were linked to the cultural, economic, and political passing, and functioned as discursive and graphically representative visual devices; that were, mainly, of foreign origins, diffusers of new codes of inclusion and social exclusion in order to be models of civility. The objective of this research is to review the state of the art of socio-visual hegemony in writing models and its relationship with that culture. In consideration of John B. Thompson (2002) [1] the media potentially transform the culture and daily life of the societies on which they act. The initial method was aimed at identifying the corpus of these (49) objects, their textual and argumentative study with a descriptive and interpretive exploration from the design point of view. For this, authors such as R. Williams (1997) [2], S. Hall (1984) [3] and Verón (2005) [4], were considered, while the methodological perspective to think about the articulation between socio-visual hegemony and graphic representation was the deep hermeneutics proposed by Thompson with analysis socio-historical discursive. This research with a qualitative-interpretive approach considers that the writing models supported imaginaries of progress, and this non-thematic graphic record allowed to link the cultural and visual dimension with the structural political dimension; to later identify the dialogue between these two dimensions. What was demonstrable through the empirical historiographic analysis carried out in writing models and the clear understanding of the concept of socio-visual hegemony.*

**Keywords:** Socio-visual hegemony; Writing models; Social identification.

## 1. Introducción

La ciudad de Tampico fue plagada por edificios estructuralmente magestuosos para la época de 1914 a 1930, como resultado del gobierno de Porfirio Díaz y el despliegue de operaciones petroleras. El descubrimiento de la faja de oro en el año 1908 y el impulso de la explotación petrolera durante la 1era. Guerra Mundial de 1914, dieron impulso a Tampico como puerto principal a nivel mundial [1]. La modernidad porfiriana progresista y el auge petrolero permitieron edificaciones monumentales con espacio de 60 manzanas donde se ubicaron 150

fincas históricamente valiosas como legado cultural.

En esa modernidad edificada aparecieron modelos de escritura gráficos identificativos como inscripciones simbólicas, que identificaron y representaron uno de los principales instrumentos y medios con los que contaron los arquitectos para penetrar en el complejo mosaico cultural en México. El binomio que se estableció entre –inscripción- modelo de escritura - símbolos gráficos - gráfica identificativa- y la arquitectura fue el detonante como parte del discurso comunicacional-cultural en Tampico. Este estudio reflexiona sobre la *hegemonía socio-*



*visual* a través de esos objetos y el encuentro de formas de registro del pasado como transformador potencial de cultura.

Los *modelos de escritura gráficos identificativos* mantuvieron significaciones ligadas a la producción gráfica descrita en aspectos visuales; materiales de época aplicados; cruce de temas traducidos sobre bienes pluriculturales; históriografía descriptiva y usos temporales. “La forma arquitectónica puede, en el mejor de los casos, señalar el objetivo de un edificio, mientras que las letras en los edificios lo denotan” [2]. En otras palabras, la premisa sobre el diálogo entre arquitectura y gráfico inscripto como proceso focalizado en la idea proyectual y el objeto construido, así como la conjunción entre ambas partes: dimensión abstracta y significacional de poder hegemónico visual, social y cultural.

La idea de *hegemonía socio-discursiva* discutida, en tanto universo de discurso, configura una problemática de significado y un contexto ideológico que supone la visión del mundo y de la sociedad para la comprensión del efecto de sentido social [3]. De modo que, surgieron interrogantes sobre la relación entre la hegemonía socio-visual observada en los objetos y el papel del objeto inscripto en la superficie arquitectónica. Realmente la hegemonía socio-visual mantiene una relación con el utilitarismo otorgado arquitectónicamente al objeto de diseño bajo un modelo de escritura.

Eso, hace pensar que la importancia discursiva cultural de esos objetos narra la historia por medio de formas importadas de extranjeros (principalmente europeos) que fueron absorbidas hegemónicamente por los habitantes de Tampico, para distinción, jerarquía y poder; en

edificaciones majestuosas, construidas por el estado, multifamiliares y edificaciones pequeñas o casas habitación de construcción modesta. Lo que resulta fragmentario en las condiciones de producción con representación ideológica y prácticas sociales.

En algunos *modelos de escritura gráficos identificativos* las letras fueron figurativas, alusivas, metafóricas, por ejemplo, esculpidas y materializadas, que representaron el lenguaje y la época con conceptos escritos que orientaron su identificación. En esos se representaron expresiones vinculadas aspectos sociales, culturales, políticos y económicos que, con mayor o menor profundidad, descriptas estructuralmente en los soportes y los espacios inscripcionales. Son huellas materializadas que contrastativamente exponen características histórico arquitectónicas.

Los *modelos de escritura gráficos identificativos* estuvieron basados en el alfabeto latino y figuras en el contexto de hegemonía socio-visual que describen parcialmente la historia de principios del siglo XX, así como el funcionalismo y los principios del diseño moderno. En el libro *Modernism and Design*, Greenhalgh (1990) [4] sostuvo que etapas históricas principales fueron entre los años 1914 y 1929, y otra en la década de los años treinta. La primera etapa consistió básicamente en un conjunto de ideas, en una visión de la capacidad del entorno diseñado para transformar la percepción humana y mejorar las condiciones materiales, mientras que la segunda etapa fue menos una idea que un estilo. Los años treinta se consideran como la etapa de difusión internacional del objeto del movimiento moderno, la simple estética de la máquina, que se



introdujo en ambientes y espacios de todo el mundo.

Es importante identificar la cultura escrita a partir de esos objetos, desde el horizonte cultural hasta la historia del objeto gráfico-simbólico. Los ejes de discusión sobre la materialidad esos modelos constituyeron un terreno de disputa simbólica y orden epistemológico en la medida en que puso en crisis el conjunto de criterios de validación de ciertos contenidos, las formas de producción y el uso de la información. Los *modelos de escritura gráficos identificativos* sirvieron como dispositivo espectral como binomio entre la comunicación gráfica y la arquitectónica.

El estrecho vínculo entre el diseño gráfico y la historia estuvo directamente vinculado con los *modelos de escritura* de los textos y de forma particular con la materialidad de las gráficas identificativas en las fachadas históricas como objetos organizadores de conocimientos. En ese contexto la pluriculturalidad mantuvo diferentes aproximaciones con el lenguaje y la escritura, como registros del pasado que determinaron formas de control (élite burguesa, distinción, entre otras) y modificación los sistemas de registros en la visualidad de su materialidad y su trascendencia cultural.

Es preciso decir que no todas las ciudades de México contaron con esa amplitud de documentación visual como los *modelos de escritura gráficos identificativos* en Tampico, que, conducen a la complejidad para pensar y estudiar la historia de esa sociedad de forma homogénea y categórica. Algunas ciudades de México como San Luis Potosí, Nuevo León, Guadalajara, entre otras, presentan edificaciones con objetos inscriptos con características

independientes, pero que pueden considerarse en la superficialidad con similitudes estéticas, mas no comunicacionales ni históricas. La diversidad en la producción de lo gráfico-escrito tiene que ver con el hecho subyacente de que no todas las sociedades asumen lo gráfico-escrito como algo propio y en numerosos casos se considera que sólo hay modelos de escritura gráficos exógenos a la sociedad, de manera complementaria; así como sus usos.

En Tampico, los *modelos de escritura gráficos identificativos* mantienen un repertorio de géneros gráfico-escrito con una genética propia, por ejemplo, no son evidentes aquellos para usos privados; algunos géneros están ligados poco o nulamente representados con la cultura local. En otras palabras, existe una diversidad gráfica-escrita que es posible pensarse utilitaria porque funcionó con relación a la complementación materializada-construida de la tradición oral. Existen otros elementos que analizar para explicar la mayor o menor producción de esos modelos gráficos que identifican con potencia y caudal de lo escrito en su comunicación y lenguaje (idioma).

De tal modo que, es posible una correlación entre el modelo de escritura con identificación y sistemas de notación de forma previa al contacto. Esos fueron descriptos y matizados por la inexistencia de registros previos a este estudio donde concentraron mayor atención filológica [2]. En consecuencia, probablemente fueron estas las que contaron con el mayor número de producciones pluriculturales en México de principios del siglo XX.

El idealismo social y político de principios del siglo XX consideró a la cultura material en la



actividad política de propaganda con poder para la transformación ideológica mediante el imaginario de modernidad. La función comunicacional del diseño gráfico bajo ese contexto revolucionario fue sumamente importante con la fuerza de la composición tipográfica (mediante el uso de forma, tamaño, proporción y composición) que permaneció en la articulación comunicacional-arquitectónica.

De modo que, existió una articulación entre el diseño de los modelos de escritura y la arquitectura burguesa o de la clase dominante, que a su vez marcó un modelo que influenció en la mimesis de la adopción de inscripciones en las viviendas multifamiliares o de clase obrera. Probablemente, su adopción estética y lingüística significó una distinción o simulación de progreso social para la modernización. Eso, presentó características estéticas: simplificadas, geométricas, cohesión, abstraccionismo, relación entre lo individual y lo universal con pluriculturalidad de objetos modelo; con libertad, normalización o estructura posicional, entretejido o nudo, emancipación u orientación con densidad relativa.

El idealismo social y compromiso con la materialidad en el pensamiento de los diseñadores caracteriza una faceta del movimiento moderno donde existió interés por el acercamiento de orientación espiritual a la cultura material expresado en obras por ejemplo, como las de Wassily Kandinsky y Johannes Itten profesores en la Bauhaus. Los arquitectos y diseñadores comprendieron la potencialidad entre la vinculación de la cultura material, el diseño moderno y la reforma social democrática en el periodo de entreguerras, aun cuando industrialmente las artes decorativas no

abandonaron su vínculo con el lujo; precisamente, la vivienda multifamiliar con inscripciones.

El florecimiento del movimiento moderno se hizo visible el hasta el año 1930 con estética alemana donde lo funcional se relacionó con la belleza. La selección de los materiales de los *modelos de escritura gráficos identificativos* como piedra, metal madera, arcilla, etc., formaron parte de la aplicación del conocimiento en la planeación utilitaria y estructural de la producción gráfico-arquitectónica y sus elementos constituyentes; formas estéticas simplificadas, algunas con poca ornamentación, metafóricas. El proceso de construcción gráfico arquitectónico fue conductor de los componentes estructurales internos (en la materialidad y el lenguaje escrito). La fabricación de objetos hechos manualmente fue el caso de los *modelos de escritura identificativos* con su estética de simplicidad o sin exceso de ornamentos. Precisamente, ese momento de utilitarismo inscripto gráfico-arquitectónico consideró la *universalidad*, o pudiera ser, la *hegemonía socio-visual pluricultural* como identificación en las fachadas con la creación de lo manual: uno por uno.

Los *modelos de escritura identificativos* que hoy forman parte del historicismo estuvieron enfocados hacia un público de élite con aspiraciones y retomados por multifamiliares durante la década de los veinte. Es decir, la estandarización penetró no solo en grandes edificaciones de élite sino también en vivienda popular. Entonces, ¿los *modelos de escritura identificativos* están inmersos en fines publicitarios gráficos? Posiblemente, desde la mirada del diseño moderno se observe a la



publicidad gráfica como sustento e influencia sémica con matices psicológicos emocionales en búsqueda del científicismo.

En ese sentido, se puede considerar al materialismo dialéctico como conducente del movimiento moderno, donde, la materialidad se relaciona con la realidad manifestada, concreta o abstracta, como el caso de esos modelos escritos o gráficas identificativas. Precisamente, con base a esos objetos la intención fue la de transformar el estilo de vida por medio de la materialidad edificada y la estética paisajística urbana, distinta, con vinculación entre expresividad y representatividad social material.

### Antecedentes

En el año de 1910 a 1930, los *modelos de escritura* diseñados en la Bauhaus y movimientos asociados se caracterizaron por ser estrechos o reducidos, por ejemplo el de H. Bayer en el edificio Bauhaus en Dessau pasando de Weimar 1919-1925. En ese transitar histórico existió la generación de estilos o modelos letrísticos o escriturales que se experimentaron en la superficialidad de tendencias arquitectónicas (constructivismo; de stijl; futurismo; entre otros) por pintores, artesanos, arquitectos, etc. Es decir, estilos utópicos de letras, estructurados y adaptados a pequeños espacios ubicados en la parte principal de los edificios que posteriormente se transformaron en mediatización arquitectónica y profesionalización de las artes gráficas.

El diseño y la letra fueron sistemáticos con características de justificación (alineación, inclinación, ornamentación, entre otras) donde arquitectos o constructores creativos

concepcionaron la señalización o identificación de edificios. A partir de eso, fue posible que los arquitectos hayan considerado la identificación clara e integral como una necesidad para edificios públicos.

Los *modelos de escritura* fueron pluriculturales donde en ocasiones no se consultó a tipógrafos sino más bien se apoyaron en catálogos de letras con modelos de escritura establecidos. Esos, no solo fueron portadores de la transmisión del significado de sus palabras, sino la actitud hacia ellas. Por un lado, la hegemonía *socio-visual* apuesta a comprender cómo parte del concepto de *socio-artístico* que se direccionó por medio de la función sigue a la forma, elementos o conjunto construido que se vio comprometido en los modelos de escritura. Por otro, hegemoníicamente se repiensa la existencia de tensión cultural con inferencias extranjeras estéticas como fondo en la arquitectura funcionalista construida en Tampico.

Sin embargo, la hegemonía socio-visual sucedió por medio de la estructura arquitectónica con frontispicio enmarcativo de carácter modular contenido que circundaba la inscripción. Los arquitectos, constructores creativos o artesanos fueron quienes generaron modelos de escritura a partir de letras expuestas en nombres superficialmente tridimensionales con significación de fondo en términos comunicacionales, visuales y constructivos del espacio; y, modernos e influyentes para la época. “Las letras gigantes surgieron como parte de las ideas en la arquitectura, no signos aplicados (...) las letras se realizaron en el material del edificio como solución estructural” [2].

La manifestación inscrita como modelo es una conjugación del objetivo y la interpretación que



actúa en el escenario de la cultura para una dimensión significativa de lo que está escrito: tipografía, gráficos, ornamentos, materiales, ubicación, superficie arquitectónica. Esos objetos de diseño cultural, gráficos identificativos o *modelos de escritura*, contienen células rítmicas, vocabulario hegemónico, asociaciones, metáforas, fusión de estilos, que es posible grupularlos categóricamente como estructura, función temática, modelos de organización social, entre otras.

A partir de la década de 1910, las primeras escuelas de artes gráficas aplicadas se establecieron en Europa occidental, y el diseño y la tipografía se enseñaron sistemáticamente con una perspectiva moderna. La formación proporcionada en la Bauhaus desde el año 1919 en Weimar, y, posteriormente en Dessau en el año 1925, fue fundamental en las artes gráficas y la arquitectura, experimentaciones con combinaciones entre el arte y la función.

Asimismo, desde Moscú hasta Alemania con la inclusión de Kandinsky en el año 1921 se compartió la interdisciplinabilidad entre arquitectos, diseñadores gráficos y tipógrafos. Eso, influyó en el surgimiento de la arquigrafía con la integración de elementos de comunicación gráfica-visual en la arquitectura aun con el uso de guiones romanos y letras ornamentadas; posteriormente, las gráficas identificativas de señalización en las fachadas de edificios con fines comerciales o publicitarios. Los arquitectos revisaban las estructuras y analizaban con diferentes secuencias de movimiento por dentro y por fuera de los edificios, observando su visibilidad, iluminación de contrastes en sus estructuras. Por ejemplo, para los ornamentos tipográficos en cuadrícula irregular o patrones

regulares, capas superpuestas con variedad de nombres, idiomas, alfabetos y letras con la intención de homologar la estructura dispuesta. Sin embargo, los patrones quebrantan los contrastes y suavizan las estructuras, algunos se abstraen con crudeza, otorgando o no la legibilidad ambicionada. Entonces, se reduce la expresividad pero se adapta a la superficie arquitectónica.

En el entretejido lingüístico de la arquitectura con metalenguaje materializado los *modelos de escritura* dimensionales para señalización arquitectónica responden a la adecuación sobre la superficie y línea base constante; con la creación de variantes proyectadas en diferentes grados de luz y sombra, inclinaciones o bordes que permiten distintos matices direccionales para un frente icónico o lateral; la profundidad de 5-10 centímetros escultóricamente con iluminación natural. Con el uso del color se logra la fusión óptica de las letras con el fondo, así como estabilidad visual y dinamismo, dentro y fuera del conjunto.

La influencia modernizadora era múltiple, francesa, sí, pero también británica, alemana y estadounidense, para que hubiera en México edificación moderna antes que se produjeran las manifestaciones plásticas contemporáneas a las europeas de los años veinte, y, por tanto, asociadas a la arquitectura posrevolucionaria. Esa, supuso un mayor esfuerzo en el embellecimiento de la ciudad de Tampico al que fue destinada buena parte del extranjero. La idea de convertir la ciudad en capital en el centro geográfico y neurálgico del país, es decir, el lugar desde donde se ejercía el poder de tránsito de mercancías y exportación de petróleo. La ciudad de Tampico fue una moderna metrópoli al estilo



européa urbanizada y ordenada. Los ingenieros y arquitectos experimentaban con el concreto armado y con estructuras metálicas producidas industrialmente en edificios con nuevas funciones para la sociedad que se modernizara [5].

La creación de *modelos de escritura* en la superficie de las fachadas mediante baldosas en tono natural o de diferentes colores representa una de las formas de señalización modular más antiguas. Algunos de ellos muestran el año de su creación, otros el nombre de su creador con letras llamativas de gran escala en las edificaciones del espacio público. Mientras se proyectaban y construían estos edificios con funciones modernas, continuaba el trabajo en concreto armado en edificios bajo las premisas de la tradición. También se conservaba la simetría axial como apuesta tácita a la racionalidad funcional, a la eficiencia estructural y la economía de la construcción” [5].

“La ampliación del Palacio de Hierro, inaugurada en 1911, incorporaba una torre en la esquina, con reloj y linterna, con rótulos en las fachadas en la cornisa y en los bordes de los entresijos (...) La estructura de hierro era fundamental para el Palacio, pero coincidía el concepto de anunciar productos y no sólo la función, como solicitaba la tradicionalmente académica noción de carácter. Rótulos y torres, *a manera de faros urbanos, eran ya una marca tipológica*, en París o en la ciudad de México” [5]. Los modelos de escritura se consideraron metafóricamente faros como marcas de una tipología gráfica identificativa arquitectónica.

### 1.1. Teoría de la Hegemonía Socio-visual

La noción de *hegemonía socio-visual*, básicamente, se asocia con la problemática sobre la lucha de poder cultural con impacto visual en objetos de diseño gráfico en la vía pública, en tanto, se pretende comprender el proceso histórico de complejización a través de modelos escritos en fachadas arquitectónicas. Donde, a partir de nuevas aproximaciones se logran nuevas categorías y se asume la complejidad de la *hegemonía visual* con utilitarismo social durante principios del siglo XX.

La estructura ideológica se difunde (entre otros aspectos) por medio de gráficos contruidos (material ideológico) dispuestos como parte del paisaje urbano. De acuerdo a Gramsci (2003) [6] son un medio de difusión ideológica que tiene una rapidez, un campo de acción y un impacto emocional mucho más vasto que la comunicación escrita, pero superficialmente y no en profundidad. Dentro de esos canales ideológicos se encuentra la arquitectura, la disposición de nombres, insignias, inscripciones o modelos de escritura dispuestos en la vía pública.

La hegemonía socio-visual en los modelos de escritura mantuvo una articulación compleja entre la sociedad civil, su cultura, su política, entre otras, estructura y superestructura; de modo que se condujo una homogeneidad y estructura ideológica. Con eso, se controló la disposición de cierto elemento gráfico-lingüístico como parte necesaria en la arquitectura, y lucha entre estratos sociales y visuales. Eso, no significa que existan diferentes objetivos en la integración de un modelo de escritura en la arquitectura para su identificación, así como diversas vías en su



implementación. Por ejemplo: la distinción de un edificio de la burguesía o clase dominante por sobre uno de clase subalterna, o la fecha como testimonio de antigüedad y relevancia histórica por sobre otra de un año más reciente que demuestre menor jerarquía en la memoria social, o el gusto anhelótico, entre otros aspectos.

De acuerdo a Pierre Bourdieu (2010) [7] la necesidad de distinción se observó en la duplicidad de formas que representaron el

lenguaje y la cultura. Para este autor el gusto es una construcción legitimada socialmente y se despliega bajo la lógica de la reproducción social. A través de inscripciones representadas arquitectónicamente se naturalizó el uso de lenguaje, símbolos ornamentales, como códigos importados con forma de estatus social y de acceso al mundo civilizado. En la mayoría de los *modelos de escritura* apareció la asociación de símbolos y lenguaje de utilitarismo como bien moderno (como se presenta en la figura 1).



Figura 1. Modelos de escritura con asociación de símbolos y lenguaje de utilitarismo como bien moderno. Toma fotográfica propia

En la primer figura aparece el caso de estudio del modelo de escritura *El Mundo* que pertenece a un periódico de difusión con tecnología de punta para la época de principios de siglo XX, como vínculo metafórico a la universalidad con el entorno; con asociación simbólica de un búho y un mundo abstracto. En el segundo caso de estudio, el modelo de escritura *Recreo Tampiqueño*, relacionado con actividades sociales por parte de la recurrencia de clase social media; con asociación simbólica de la abstracción de una concha referente al puerto.

En una aproximación discursiva, el utilitarismo otorgado a las acciones que deben sostener el orden establecido en las sociedades surgió en Inglaterra en el año 1930 en las ciencias sociales, especialmente en sociología y antropología social. El utilitarismo estructuralista es una construcción teórica que ve a la sociedad como un sistema complejo cuyas partes trabajan juntas para promover la armonía social. Sin embargo, es

resultado de la síntesis de diversas ideas que imponen cambios políticos y sociales posteriores a la crisis de la 1era. Guerra Mundial, con particular impacto en Alemania.

La producción práctica con presupuestos económicos y la urbanización de ciudades modernas según la visión bauhausiana de Gropius (Pevsner, 2000) [8] se caracterizaban por un poderoso lenguaje visual compartido que se convirtió en sinónimo del término conceptual *moderno*. De acuerdo esa teoría en la esfera pública existió desde el predominio emancipatorio de lo racional por sobre lo irracional, hasta la desconsideración del consumo con sesgo genérico y exclusión social. La representación gráfica con los *modelos de escritura identificativos* en la vivienda de élite burguesa o clase dominante es posible observarlos en las viviendas multifamiliares o de clase social obrera como resultado de la influencia estilística sutilmente ubicua de una



clase sobre otra, aunque su hegemonía se observó en diseños posmodernos.

El utilitarismo partió de una fundamentación espiritual que buscó la expresión simbólica del movimiento moderno basado en la unidad orgánica entre el arte y la técnica; lo fundamentado *esencialista* como función con inclusión de aportes científicos y estéticos que dieron como resultado una conjunción entre la gramática del diseño y la composición morfológica.

Esa mirada propuso estándares igualitarios de lo esencial para las necesidades sociales. Por ejemplo, la arquitectura Neus Bauen [2] que objetivó el diseño fundamentalmente para su servicio, es decir, donde las letras se dispusieron por necesidad social: *modernas*, simples, estructuradas y libres de decoración. Sin embargo, desde la década de 1910 hasta 1930, los estilos de letras creados por los diseñadores de la Bauhaus no sólo fueron reducidos, sino que, surgieron estilos experimentales de arquitecturas de letras con influencia del constructivismo, por ejemplo; y otras como pequeñas estructuras

tipográficamente tectónicas con estilos utópicos del movimiento holandés Stijl y Futurismo italiano.

Bourdieu (2010) [7] advierte que los discursos sociales-culturales e imaginarios entorno al progreso permiten comprender la lógica lineal y compleja en la producción y su funcionalidad. Es así que, *los modelos de escritura* como objetos culturales de diseño hegemónicos socio-visuales en su funcionalidad utilitaria cobran valor como objetos signo. Tal como asegura Baudrillard (1974) [9] sobre una suerte de fachada que los vuelve opacos al naturalizarlos como ideas centrales de modernidad. Este autor, considera al *objeto valor-signo* como el elemento más importante en un conjunto para su identificación simbólica que aparece como capa social descrita esculpida en cada superficie arquitectónica (u otro tipo de superficie, también). Es decir, acumulaciones de recursos políticos (partidos, sindicatos, religión), hegemónicos (control social), con ideología progresista para lograr prolongar y concretizar una homogeneidad en el bloque ideológico, producción y economía en un periodo como del año 1914 a 1930.



**Figura 2.** Acumulaciones de recursos políticos hegemónicos con ideología progresista. Por ejemplo el Gremio de Pescadores y Sindicato Unido de Alijadores. Toma fotográfica propia (Lozano, 2020).

Sin embargo, el orden establecido representó un modelo de conservación por autonomía social,

como algunos casos presentados en casas habitación pequeñas e independientes (como se



ejemplifican en la figura 3). Pero, es una lucha constante entre la representación ideológica y la opinión pública, que coyunturalmente se presenta a través de la voluntad de la clase dominante y sus preferencias arquitectónicas. La hegemonía

socio-visual representada se leyó discursivamente como la combinación entre la fuerza visual impuesta y el equilibrio de variabilidad en los objetos representados.



Figura 3. Casos de estudio en casas habitación independientes. Toma fotográfica propia.

Los *modelos de escritura* como espacios de socialización con pautas culturales dominantes mantuvieron un utilitarismo social esencial al propagar formas de representación cultural. Es decir, se utilizaron como dispositivos visuales transmisibles e imitables con ciertas ideologías extranjeras y pocas locales. De acuerdo a S. Hall (1984) [10] operan como un sistema de creencias y prácticas simbólicas que se desarrollan y reproducen en un contexto social y especial determinado dentro de una cultura, y favorecen al establecimiento de estas como hegemónicas. Por ejemplo, actividades de enseñanza-aprendizaje como escuelas; actividades para reuniones sociales como sindicatos; o, actividades de recreo social; que fueron inscriptas en la cultura con significación de la práctica como propia de una sociedad moderna.

### 1.2. Hegemonía Socio-visual en la historia de Tampico

Con la revisión discursiva de relatos expuestos por los primeros cronistas de la ciudad se advirtieron episodios de concreción de una nueva cultura en torno a las letras inscripcionales o *modelos escritos* en los registros colocados

espectatorialmente. En ese sentido, a partir de la implementación generalizada del alfabeto latino como sistema de transliteración de lenguas americanas, la tecnología tipográfica fue aliada de sucesos trascendentes como aquellos evangelizadores y de la corona española. La imprenta tipográfica, por su parte, llegó a México en el año de 1539, con lo que marcó el inicio de difusión por América Latina. Eso, se llevó a cabo por medio de manuscritos en lenguas nativas que convivieron con materiales impresos, así como con interacción e influencia legal y normativa, ortográfica y estética.

En la travesía histórica descriptiva lingüística consolidada, la imprenta tipográfica tuvo un papel fundamental con sistemas de notación originales con adaptaciones de letras diacríticas y otros signos. La observación de la interacción entre la tipografía y su producción material de *modelos de escritura* identificados permiten vislumbrar gran variedad de estrategias tipográficas; que, van desde la creación de moldes y matrices para la elaboración de signos hasta la adaptación de caracteres de imprenta tradicionales y la re funcionalización de letras de diversa creación.



Se observaron ajustes tipográficos en la edición de gramática de la lengua general y letras del alfabeto latino donde se empleó una letra mayúscula y minúscula adheridas. Sin embargo, las adaptaciones más frecuentes se relacionaron con el sistema de diacrítico por la jerarquía, estatus social y disposición en la superficie material. En ese fue posible observar *modelos de escritura* con uso de signos de puntuación intermedios como delimitación de continuidad, modulación con libertad en el movimiento, diferenciación jerárquica entre el peso o tamaño, entre otros aspectos relevantes.

El conocimiento de culturas hegemónicas que anteceden a un grupo se encuentran incluidas como registro histórico por medio del lenguaje con el idioma los objetos de estudio gráfico-lingüístico-arquitectónicos. Eso, implica una revisión compleja de documentación de principios del siglo pasado (XX) que potencia la comprensión del presente y sus vertientes, por ejemplo, la hegemonía socio-visual, el funcionalismo social y arquitectónico. Esos hallazgos, sacan a la luz la importancia en la integración del funcionalismo estético-gráfico-socio-visual en edificaciones contemporáneas, como parte de la ritualidad que antecede con funcionalidad comunicativa y representativa social; más que la dinámica de uso comercial y político actualmente explotadas. Observar y analizar sobre el fondo de la superficie entorno a la funcionalidad permitió entrever aspectos de distinción sistemática en la circulación de la producción de los modelos escritos, su concepción y objetivo de lectura, así como la relación en la acumulación temporal material iconográfica y cultural.

El conocimiento de modelos gráficos de carácter comunicativo, representativo, comercial identificativo, y político o religioso, promovió el dramatismo y hegemonía cultural-lingüística en aspectos de orden ideológico religioso para la dinámica contextual de la época entre 1914 a 1930. Temporalidad donde el relato transcurrió entorno al imaginario de progreso y control del poder que se escribió en los *modelos de escritura*, algunos en otro idioma, otros, de otra cultura. Eso, se pudo revisar en un trazado de dispersión bibliográfica, libros, declaraciones de sujetos sociales en medios digitales (páginas de la historia de la ciudad), postales históricas, como informantes primarios.

En una perspectiva constructivista sistémica de Luhmann (1998) [11], establece desde el plano semántico, la distinción de un sistema funcional *hegemónico socio-visual* que se comporta automáticamente excluyente vinculado al imaginario colectivo del funcionalismo. De ahí que, sale a la luz el performance en la puesta gráfica-lingüística en los modelos de textos con diferente contrastación, redondos, romanos, góticos, cursivos, entre otros, fue en niveles macro gráficos expuestos; la presencia sistemática de los años en que fueron construidos como constante de la época en datos macro, y las variantes en la ornamentación (propias de una ciudad puerto costero) y estilos letrísticos en aspectos micro. De ahí que, se comparte un imaginario que circula discursivamente con la exposición en la vía pública que opera como orden social y alude a la manera de percibir la realidad.

La circulación no fue de impacto momentáneo, sino paulatino, como algo planificado para el futuro, tradicional y cultural, un ritual



arquitectónico-gráfico-lingüístico y de socialización. Esto, es una aproximación que hace reflexionar a partir de una perspectiva histórica del diseño gráfico en la arquitectura hasta una perspectiva antropológica-histórica con la hegemonía socio-visual funcionalista. Los *modelos de escritura hegemónicos socio-visuales-funcionalistas* de Tampico tuvieron inferencia como refuerzo del capital cultural y su propagación; implicaciones lingüísticas y visuales, efectos de sentido, tradición y costumbres, e impacto sobre la identidad de los sujetos sociales. Entonces, el diseño al mezclarse con el espacio urbano, la forma sobre la función, tuvo una vínculo con la economía.

“También en la expansión del arte más allá de su campo propio, cuando éste se desdibuja al mezclarse con el desarrollo urbano, las industrias del diseño y el turismo (...) Ahora vemos que el predominio de la forma sobre la función, que antes demarcaba la escena artística, caracteriza los modos de hacer política o economía” [12]. Los símbolos de poder escritos se reflejaron con frecuencia como escudos de armas, signos heráldicos, años o nombres, representando la continuidad familiar, jerarquía, distinción, memoria, entre otras. Esos representan un discurso genealógico como huella cultural hegemónica socio-visual bajo el imaginario del utilitarismo social.

Actualmente, los modelos de escritura se encuentran sin uso en las latitudes de las edificaciones históricas compartiendo espacio con anuncios luminis o gráficas identificativas comerciales. La comprensión de esos elementos constituye un factor determinante para el diseño y la comunicación de manera estética y utilitaria. Sin embargo, esta claro que constituye un reto en

aspectos hegemónicos culturales que influyen en el creador y sus determinaciones. Algunos de los aspectos que posibilitan esa conjunción, son: 1) El espacio y formato; 2) Los acabados de construcción; 3) Los materiales; 4) La iluminación.

En primer término, la consideración del espacio y el formato constituye un ejercicio para el diseño con el conocimiento del área donde se realizará el trabajo creativo; para la disposición con base a la cantidad de elementos, la distancia entre unos y otros, por ejemplo. En ese sentido, la tonalidad entre los elementos representados conduce a relaciones espaciales y focales de impacto funcional o no para el espectador. En segundo término, la planificación en los acabados o recubrimientos de construcción sobre los materiales base que funcionalmente otorgan estética visual-social, como: barro, cemento, mármol, piedra artificial, pastas acrílicas, entre otros. En tercer término. Los materiales como parte de la utilidad que sigue a la función de los que derivan cualidades en la construcción y el ornamento. Algunos de los materiales son: naturales, artificiales, aglomerandos, metálicos, orgánicos y plásticos.

Finalmente, en cuarto término, se refiere a la iluminación que define el impacto de luminosidad en los elementos, volumetría, textura y contraste del color en el espacio; y que contribuye a la ambientación del espacio como recurso estético del diseñador para la interrelación de elementos en la construcción de *modelos de escritura*.

Es así como la propia manifestación modelística escritural viene a ser una conjugación de propósitos y jugadas interpretativas que actúan



en el escenario de la cultura del que resultan dimensiones significativas de lo escrito; actúan en la tipografía y las ilustraciones con la acción de los agentes inmersos en su proceso [13]. El modelo de escritura como objeto cultural materializado suscita percepciones sobre las relaciones entre las cosas y pone en acción circunstancias cognitivas relacionadas con la historia, con dogmas e intereses sociales, culturales, políticos y económicos. Los diseños modelísticos escritos son objetos espaciales exteriores que se distinguen con el uso dimensional, de forma, de ubicación espacial, traspolados a la estética funcionalista como modernidad capitalista patriarcal; pero que, definitivamente contribuyen a su identidad hegemónica socio-visual. Los modelos de escritura se realizaron por arquitectos, pero se adoptaron socialmente por la comunidad; fueron pocas las casas habitación modestas o de la clase subalterna, que las incluyeron.

## 2. Metodología

De un universo de 104 objetos culturales comunicacionales-arquitectónicos históricos - *modelos de escritura*- en la inmediaciones de la ciudad de Tampico, México, registrados en un proyecto de investigación “Tipología discursiva de la memoria gráfica identificativa en las fachadas de edificaciones históricas, para la resignificación cultural y comunicacional del diseño tampiqueño” que se realizó de agosto 2019 - junio 2020 por la doctora Rebeca Lozano, se procedió a dar continuidad con este estudio reflexivo en atención a sus hallazgos obtenidos sobre el vínculo entre la hegemonía socio-visual y el utilitarismo en esos objetos.

Una vez hecha la revisión, se observaron características determinantes como circulación (significación temporal o de época y utilidad), materiales (estructura) e identidad cultural, se seleccionó un recorte temporal de 49 objetos (del universo de 104) de modo aleatorio en cuanto a estilos que fueron construidos durante el periodo de 1914 a 1930. Se reconstruyó la gramática de producción del discurso del objeto de estudio hegemónico-socio-visual, para describir algunas retóricas en esos enunciados mediatizados (en la plataformas mediáticas o modelos de escritura). Tomando en cuenta a John B. Thompson (2002) [14] los medios de comunicación transforman potencialmente la cultura y la vida cotidiana de las sociedades sobre las que actúan. El método inicial se orientó en identificar el corpus de 49 objetos, su estudio textual y argumental con una exploración descriptiva e interpretativa a partir de la mirada del diseño. Para ello, se consideraron autores como R. Williams (1997) [15], S. Hall (1984) [10] y Verón (2013) [16], mientras que la perspectiva metodológica para pensar la articulación entre hegemonía socio-visual y representación gráfica fue la hermenéutica profunda propuesta por Thompson con análisis discursivo socio-histórico.

Apartir de la dimensión del poder [17] se interpretó sobre la hegemonía socio-visual con colonialismo cultural por medio de su representación visual y el utilitarismo bajo la objetivación de forma-función. Con base a eso, se obtuvieron datos con **fuentes primarias** de tipo documental, principalmente libros en portugués e inglés, medios digitales de la historia de Tampico, que sirvieron como sustento en los análisis realizados. La interpretación de rasgos temáticos en la vida social, cultural, política y mediática retomados con la construcción de



vínculos enunciativos para la categorizaron y caracterización discursiva social; a partir del cuestionamiento que apuesta a la comprensión y análisis del poder hegemónico socio-visual bajo un paradigma utilitarista y su distribución normalizada como distinción de poderío jerárquico social y político.

Entonces, a partir de la perspectiva socio-semiótica el uso de *modelos de escritura* como *plataformas mediáticas* productoras de sentido como producción que constituye un espacio de circulación del discurso y cuerpo mediatizado (Valdivia-Barrios, 2018) [18]. Asimismo, es una interfaz de sentido donde se producen y circulan complejos discursivos con entretejido de vínculos sociales y sensibilidades estético-políticas. Esos objetos, analizados e interpretados como plataformas mediatizadas, hacen que el sujeto social opere en su reconocimiento y su producción; es decir, son superficies de contacto visual y vinculación.

En otras palabras, la discusión analítica sobre el “qué” y el “por qué”, se habla o no, de este tema de manera contextual. Este autor, desfragmenta a partir de este concepto la realidad social, sus características y transformaciones para objetivarlo con beneficio para discursos mediáticos (socio-visuales); donde, la hegemonía socio-visual llega a formar parte del dialéctico en la normalidad con carácter estructural naturalizada ideológicamente.

Las categorías de *libertad*, *normalización*, *entretajido*, *emancipación*, aparecen como parte de los procesos de transformación hegemónica pluricultural que devela una condición de utilitarismo social. Esas, surgieron de la revisión documental histórica con la recabación de

repositorios de diferentes disciplinas, algunos contrastantes, que sacaron a la luz asociaciones de posición jerárquica e histórica, procedentes de fuentes visuales y no visuales, como reforzamiento contrastativo entre la hegemonía socio-visual representada y el utilitarismo otorgado a esos objetos; es decir, la contrastación relativa entre los objetos de análisis y su funcionalidad (forma-función-circulación; función-circulación-forma).

La comparación entre los objetos hegemónicos socio-visuales y su contextualidad sugiere principios de análisis centrales sobre las formas existentes y sus efectos sociales en 49 objetos de diseño como modelos de escritura expuestos en la vía pública de una ciudad de México, Tampico. Como en todo estudio, la finalidad no es demostrar hechos en forma definitiva y determinante, sino desarrollar ideas y metodos a partir de la teoría de hegemonía socio-visual -funcionalista-; como género sociol-visual materializado demanda ser identificado, descripto y clasificado.

La asociación sobre la problemática de lucha de poder cultural con impacto visual de los modelos de escritura, saca a la luz el proceso histórico de complejización de *hegemonía visual* con *funcionalismo social* en el periodo del *funcionalismo estético* con aproximaciones de nuevas categorías derivadas de la selección, transformación y exposición (transmisión expuesta).

Se construyeron categorías como *materialidad estructural*, *identidad cultural funcionalista* y *significante social* para análisis de las modalizaciones significantes sobre los objetos -modelos de escritura- mediatizados en la vía



pública. Los objetos de análisis (modelos de escritura) se encarnan en la enunciación de su materialidad, al servicio de su identidad-función y con movimiento significativo con disputas significantes que surgen en función de efectos del discurso del poder en el marco de una matriz hegemónica cultural.

Por un lado, el carácter paradójico que tiene la categoría de identidad cultural funcionalista para hacer referencia a individuos que fueron influenciados por la funcionalidad del objeto como circuito y práctica económica, jerárquica y distintiva. Por otro lado, la categoría de materialidad estructural contribuye al establecimiento de una concepción alternativa frente a la problemática comunicacional del objeto escrito que advierta, señale, informe, entre otros, con fuerte contenido ideológico; con la propuesta de repartir el capital, política y partidariamente, no neutra. Finalmente, la categoría de significante social como realidad representada de su estilo de vida ante impulsores de imaginarios que participan en la construcción de la cultura visual y la generación de la mirada, y la postura social de una colectividad. Algunos hallazgos corresponden categóricamente a la circulación utilitaria, la estructura o materialidad y la identidad, analizados de manera independiente a partir de los *modelos de escritura*.

Tanto Sarlo, como Schorske o Berman [19], establecen la necesidad de un enfoque múltiple del problema, donde se admite la pluralidad y complejidad del fenómeno que se analiza pero también simultáneamente a la unidad profunda de corrientes de sentido que lo atraviesan. En este caso, se hace referencia a fenómenos de origen discursivo diverso, económico-políticos,

arquitectónicos y comunicacionales, en el proceso de materialidad gráfica y la verificación de que la hegemonía socio-visual “dominación social por medio de la percepción visual que dirige la clase dominante” está relacionada con el funcionalismo “todo lo utilitario sostiene un orden social”, presentada como idea central. Es imprescindible reconocer la diferencia entre hegemonía socio-visual y el utilitarismo de las cosas. ¿Es posible que los objetos de escritura fueron creados bajo esa idea utilitaria? ¿Qué discursos hay detrás de los estilos de letras en edificios históricos? ¿Cuáles son los motivos estratégicos que les dieron forma?

Finalmente, a partir de esos cuestionamientos se precisó una contrastación de lo micro a la macro con los objetos representados o plataformas mediatizadas en Tampico y el mundo (local, nacional e internacional) que arrojó elementos externos de los propios discursos en tiempo y espacio. Es decir, producciones de discurso que incurrieron en crónicas simultáneas y operaciones enunciativas propias de sus entornos que habrá que profundizar en una extensión de esta investigación.

De acuerdo a los análisis interpretativos realizados entorno a la dimensión del poder manifestada en la hegemonía socio-visual y utilitarismo, por un lado, se interpretaron con la observación de la hegemonía socio-visual como producto de la colonización cultural por medio de la exposición visual impuesta a través de esos objetos con características estéticas importadas o extranjeras. Por otro lado, el utilitarismo se condujo mediante el imaginario de forma-función que fue claramente identificado, aunque en ocasiones no fue plenamente espectral.



### 3. Resultados y Discusiones

En la categoría de identidad, se obtuvo que, los modelos de escritura proveyeron de identificación al objeto por medio de la circulación y obtuvieron el reconocimiento del sujeto social, es decir, la identidad distinguida (por medio de la distinción antes descrita). Por otro lado, estructuralmente el modelo de escritura en la arquitectura mantuvo una relación espacial con el sujeto social y otros objetos instaurados en la vía pública; donde, los objetos estuvieron provistos de significados emotivos (poder, jerarquía, visibilidad, entre otros aspectos) con referentes para el sujeto espectador.

En ese sentido, el utilitarismo de los modelos de escritura fueron clave en la comunicación simbólica hegemónica socio-visual para jerarquías en el poder y visibilidad instruccional social. Los análisis que se llevaron a cabo fueron a partir de la observación para el reconocimiento sistemático de los objetos de análisis. Se realizaron muestras fotográficas que correspondieron al registro de ubicación y visibilidad en la circulación con presencia fuerte o débil, que mantienen estructuralmente como objetos históricos correspondientes al periodo de 1914-1930 en la vía pública; como se presenta en la figura 4.



**Figura 4.** Muestras fotográficas de los modelos de escritura en circulación que se mantienen estructuralmente como objetos históricos del periodo de 1914-1930. Toma fotográfica propia.

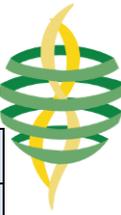
Al respecto, se puede mencionar abundancia de similitudes simbólicas generales interpretadas como estructurales, utilitarias y significacionales, como (se presentan en la tabla 1):

1. Utilitarismo comunicacional del objeto con la información difundida en su ubicación espectral (delimitación en la vía pública);
2. Utilitarismo identificador del espacio construido para identificación del sujeto social (espacio ha cierta altura);
3. Utilitarismo memorable como indicador de tiempo (fecha);
4. Estructura con nombres;
5. Estructuras con siglas;
6. Estructuras con números;
7. Estructuras con gráficos;
8. Significado de distinción jerárquica (grupo social al que pertenece);
9. Significado de poderío (tamaños, mayor tamaño, más poder);
10. Significado de origen (procedencia con nombres-idioma con adaptación al entorno);
11. Significado fundacional (fecha de construcción).



Tabla 1. Categorización interpretativa (estructura, identidad, significado) de modelos de escritura locales.

Caso de estudio	Circulación de Época	Estructura utilitaria	Identidad Cultural	Significante Social
1	1916	Estructura con números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1916	Estructura con gráfico y números	Identificatoria para organismo gremial	Distinción jerárquica para grupo gremial obrero
1	1920	Estructura con nombre de abogado, escritor maestro y político mexicano	Identificatoria para institución académica	Distinción jerárquica como lugar de adoctrinamiento y normalización
1	1920	Estructura con siglas en medallón	Comunicativa del objeto para ubicación espectral	Poderío social
2	1920	Estructura con siglas y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y de origen (inglés)
1	1920	Estructura con siglas de la familia, año y medallón ornamentado	Funcionalidad identificatoria el sujeto social	Poderío social
2	1921	Estructura con números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1921	Estructura con siglas y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y de origen (iniciales en idioma inglés)
2	1922	Estructura con siglas y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y de origen (inglés)
1	1922	Estructura con gráfico	Comunicativa del objeto para ubicación espectral	Poderío social
3	1922	Estructura con nombre y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y de origen (alemán y español)
2	1922	Estructura con números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y poderío social
1	1922	Estructura con números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1922	Estructura con nombre y números	Comunicativa del objeto y memorable como indicador de tiempo	Fundacional y de origen (español)
2	1923	Estructura con números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1923	Estructura con siglas y números	Comunicativa del objeto para ubicación espectral	Poderío social
1	1924	Estructura con nombre y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y de origen (español)
1	1924	Estructura con siglas	Comunicativa del objeto para ubicación espectral	De origen (inglés) y poderío social
1	1925	Estructura con nombre y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional, de origen y poderío social
1	1925	Estructura con gráfico emblemático	Identificatoria para institución pública del estado	Distinción jerárquica que representa al estado y poderío social
1	1925	Estructura con nombre	Comunicativa del objeto para ubicación espectral	De origen (alemán)
4	1925	Estructura con números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1925	Estructura con siglas y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1925	Estructura con números en medallón	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y poderío social
1	1925	Estructura con nombre y números	Identificatoria para institución que difunde noticias impresas	Distinción jerárquica de medio de difusión impreso y poderío social
1	1926	Estructura con nombre de abogado, escritor maestro y político mexicano	Identificatoria para institución académica	Distinción jerárquica como lugar de adoctrinamiento y normalización
2	1926	Estructura con números y gráfico	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1926	Estructura con nombre y números	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional y de origen
1	1926	Estructura con nombre y números	Identificatoria para club social recreativo	Distinción jerárquica, poderío social, fundacional y de origen
1	1926	Estructura con siglas en medallón	Comunicativa del objeto para ubicación espectral	Distinción jerárquica
1	1927	Estructura con números en medallón	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
2	1928	Estructura con año y medallón ornamentado	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional



1	1928	Estructura con nombre, año y gráfico	Identificatoria para organismo social	Distinción jerárquica para el trabajador sindicalizado
1	1929	Estructura con año	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
1	1930	Estructura con nombre y números	Identificatoria para comercio joyero	Distinción jerárquica, fundacional y de origen (español)
1	1930	Estructura con año	Memorable como indicador de tiempo	Fundacional
<b>49</b>	<b>TOTAL DE CASOS DE</b>			

Esas categorías salieron deductivamente para los análisis interpretativos de los objetos -modelos de escritura- leídos. Al comparar la muestra de 49 objetos, se determinó el estructuración utilitaria, identidad cultural y significación del espacio social de los objetos con adaptación contextual e identitaria como: Distinción jerárquica, poderío social, fundacional y de origen pluricultural hegemónico socio-visual (culturas colonizadoras). En ese sentido, el efecto de sentido de esos elementos en la imagen de la ciudad cumplió un rol determinante para que representaran poder (utilitario estructural, identitario y significativo) con la debilidad por su ubicación de altura impeceptible a la vista del transeunte contemporáneo [20]. Sin embargo, no lo fue para el sujeto social de la época de principios de siglo XX donde las veredas fueron más prominentes, amplias, y con un paisaje sin saturación visual.

Asimismo, se advierten diferencias entre los niveles de orientación de los modelos de escritura en el frontispicio (espacio dispuesto en la fachada para su ubicación) frontal, con sesgo lateral, esquinado o ángulo truncado. Como este autor mencionó, la posibilidad de *su caracter espacial proporcionado por su importancia utilitaria* con rasgos característicos -claves- en otros modelos de escritura en el mundo; y otros, que derivan de la inspiración del entorno como la vegetación. Así como, significativamente haya existido una

relación entre la superposición de los elementos en el modelo de escritura y su relación con la morfología del conjunto arquitectónico, sin embargo, esto no será abordado en este estudio que prioriza la hegemonía socio-visual funcionalista.

En ese sentido, socialmente los *modelos de escritura* significaron una guía orientadora para la historia de la ciudad, distinción entre familias, firma de creación del constructor, con el poder cultural de quien la consideró o solicitó el diseño de la obra arquitectónica. Siendo el objetivo de este estudio la comprensión del *dominio socio-visual presentado bajo la idea de utilitarismo-estético de principios del siglo XX*, como nexo de correspondencia en el binomio hegemonía socio-visual se devela el utilitarismo de la forma en si misma con el diseño como reforzamiento del significado. Los elementos significativamente aparecieron de manera continua, práctica y emotiva (como se presentan en la tabla 2):

1. *Libertad* (no hay estructura o interrelación entre las partes);
2. *Normalización o estructura posicional* (relación entre las partes con una misma dirección);
3. *Entretejido o nudo* (asociación entre una y otra parte);
4. *Sistematización u orientación con densidad relativa* (una por sobre la otra llena de detalles)

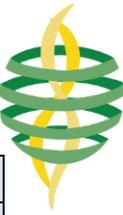


Tabla 2. Significación discursiva social de utilitarismo estético en los objetos.

Número de casos	Libertadora relacional	Normalidad estructural	Entretejido asociado	Sistematicidad con densidad relativa
1		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
2	Nula interrelación entre las partes	Relación simétrica en estructura posicional		
3		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
4		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
5			Asociación nudo entre las partes	
6	Nula interrelación entre las partes	Relación simétrica en estructura posicional		
7		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
8	Nula interrelación entre las partes gráfica-arquitectónica			
9		Relación simétrica en estructura posicional		
10	Nula interrelación entre las partes espacio-gráfico lingüístico			
11		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
12		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
13		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
14	Nula interrelación entre las partes espacio-gráfico lingüístico			
15		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
16		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
17		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
18	Nula interrelación entre las partes espacio arquitectónico-gráfico			
19		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
20		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
21	Nula interrelación entre las partes espacio arquitectónico-gráfico			
22		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
23		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
24		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	
25		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
26		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles
27		Relación simétrica en estructura posicional	Asociación nudo entre las partes	Orientación con densidad relativa una por sobre la otra con saturación en detalles



Se reflexionó sobre las consecuencias de la exposición espectral de los objetos, su posibilidad existencial y el posicionamiento funcionalista que persigue el imaginario arquitectónico en la genealogía arquitectónica. En la ciudad de Tampico, algunos de esos objetos pasan desapercibidos debido a la altitud en que aparecen representados en la parte frontal y superior de las edificaciones arquitectónicas. De tal modo que, la función identificadora, ocasionalmente, mantuvo una circulación invisibilizada e inocua (sin identificación). Es tan importante la función de la circulación por medio de la ubicación correcta a la altura adecuada para la visualización de esos objetos ante el espectador.

La hegemonía socio-visual identificada en esos objetos apareció como mensajes que estuvieron acompañados de imaginarios simbólicos representados-acumulados. Sin embargo, el conjunto de 49 objetos con modelos de escritura de 1914-1930 tienen elementos que marcan una pauta en la espectralización-circulación. El núcleo de la ciudad de Tampico se esquematizó como matriz indiferenciada entre sus elementos arquitectónicos para los sujetos comunes que transitan y no corresponden a profesionales con una especialidad en las artes, por ejemplo. Además, los objetos se encuentran dispersos dentro de una amalgama de estilos que corresponden a corrientes estéticas diversas, no

solo en los modelos de escritura sino en la arquitectura misma como parte de la superficie que los sostiene. Lo que, de alguna manera diluye su impacto visual o presencia como objetos independientes comunicativamente, pero dependientes del conjunto arquitectónico.

Los *modelos de escritura* son más vigorosos en razón de su función evidente con dimensiones de amplitud espacial estructural en edificaciones con estéticas noveausianas, decoloniales y deconianas con consideración funcionalista por la integración gráfica arquitectónica (arquigráfica). Estos, son los suficientemente frecuentes para conceder una conciliación de similitudes funcionalistas observadas por medio de su identidad, estructura y significado. La hegemonía extranjera sinuosa se representó estructuralmente por medio del colonialismo arquitectónico con funcionalismo significativo de poderío expuesto.

Se destacan por su visualidad, autenticidad y pluriculturalidad para la época, siendo parte de un corpus de huellas historiográficas en el paisaje urbano pertenecientes a estilos particulares hegemónicos que fueron un medio de colonialismo extranjero (francés, holandés, inglés, entre los principales), como: Estilo Neoclásico o Neostilo<sup>1</sup>, Estilo Art Nouveau o Modernismo de la época Porfiriana<sup>2</sup>, Estilo Ecléctico<sup>3</sup> y Funcionalismo estético<sup>4</sup>. Estos, por

<sup>1</sup> Movimiento que retoma la formalidad clásica grecorromana. Se caracteriza por la extensa aplicación de órdenes y motivos decorativos, griegos y romanos; preferencia por la sencillez y claridad geométrica en la composición; así como, medida en los tratamientos ornamentales de las fachadas. Se distingue por el uso de columnas con reminiscencia de estilo clásico.

<sup>2</sup> Estilo inspirado en la naturaleza, que retoma formas vegetales estilizadamente, con expresión con base a movimientos ondulatorios. Uso de materiales innovadores como: concreto armado, acero, hierro y lámina.

<sup>3</sup> Tendencia hacia la mezcla de varios estilos históricos; selección y conciliación de elementos formales para combinar virtudes o aumentar el contenido alusivo y evocador de la obra (movimiento desarrollado en Europa y Estados Unidos).

<sup>4</sup> Movimiento que valora la necesidad funcional de la construcción, dejando a un lado aspectos formales o decorativos. Como principio, mantiene las formas arquitectónicas, funciones, construcción de volúmenes simples y asimétricos.



medio del materialismo dialéctico con estructuras majestuosas, dimensionales, apropiadas para la época de imaginario progresista. En esa escala se hallaron reservas de identidad [21] extranjera de colonizadores, pero también de raíces locales y significado funcionalista de distinción; es decir, se concibió como *hegemónico socio-visual-funcionalista* que constituye un fenómeno vinculado estructuralmente e imaginariamente en su significación.

En Tampico, los sujetos sociales gozaron de la espectación de flores y vegetación como parte de su contexto, y de los elementos abstraídos descritos como parte de la constitución de edificaciones, tanto burguesas como subalternas. Sin embargo, estas precisiones observacionales fueron advertidas no solo en la zona sometida al estudio sino en construcciones dispersas que fueron fáciles de identificar por las características simbólicas de búsqueda en el conjunto cultural de diseño gráfico-arquitectónico.

## 5. Conclusiones

En ese sentido, socialmente los *modelos de escritura* significaron una guía orientadora para la historia de la ciudad, distinción entre familias, firma de creación del constructor, con el poder cultural de quien la consideró o solicitó el diseño de la obra arquitectónica. Siendo el objetivo de este estudio la comprensión del *dominio socio-visual presentado bajo la idea del utilitarismo de principios del siglo XX*, como nexo de correspondencia entre el binomio hegemonía socio-visual-funcionalista que devela la función de la forma en sí misma con el diseño como reforzamiento del significado.

Se observó que hicieron falta continuidades persistentes entre los grupos, sin embargo, si existieron en las partes de cada conjunto independiente. Por ejemplo, la estructura posicional funcionalista con la normalización de dirección-circulación del objeto situado en la parte superior o punto focalizado coronario de la arquitectura; cada uno con su morfología estructurada y diferenciada vinculada a hechos históricos (entre otros aspectos). Cada *modelo de escritura* se presenta integrado perfectamente al espacio arquitectónico construido haciendo que esos objetos mediáticos correspondan a un medio contextualizado en el paisaje urbano y parte del estilo de vida de los sujetos sociales en ese lugar. Es decir, el estilo es resultado de un enfoque proyectual con características adaptativas a los contextos heterónomos hegemónicos sociovisuales.

Los fenómenos de origen discursivo diverso, económico-políticos, arquitectónicos y comunicacionales, en el proceso de materialidad gráfica y la verificación de que la *hegemonía sociovisual* “dominación social por medio de la percepción visual que dirige la clase dominante” está relacionada con el utilitarismo “todo lo utilitario sostiene un orden social”. Fue imprescindible el reconocimiento de la diferencia *entre hegemonía socio-visual y utilitarismo* de las cosas. Y ciertamente, los objetos de escritura fueron creados bajo la idea utilitaria y existieron discursos detrás de los estilos de letras en edificios históricos con motivos estratégicos políticos-económicos que les dieron forma.

Las relaciones de dominación hegemónica socio-visual se muestran como justas y la modernidad del utilitarismo social como aquello que debe ser copiado por todos. Eso, precisamente es lo que



buscaban los sectores progresistas de las clases dominantes y lo que la modernidad representaba para esa sociedad. Se afirma que éste fue el discurso que prevaleció entre los modelos de escritura que circularon en Tampico de 1914 a 1930. Precisamente, la identidad tampiqueña y la época posrevolucionaria fue lo que caracterizó a esos objetos como hegemónicos utilitarios.

El modelo teórico y metodológico utilizado para esta investigación contribuye y aporta al desarrollo del conocimiento asociado a la construcción de nuevas perspectivas de estudio en la observación y análisis de producciones culturales como la arquigrafía vinculada a un fenómeno socio-histórico.

El estudio sobre las formas de producción de los imaginarios de progreso entre jerarquías sociales con relación a las representaciones visuales, se hace visible en la pertinencia de esta investigación al engrosar diferentes perspectivas; desde las que se pueden leer aspectos políticos, económicos y simbólicos. Este estudio aporta luz a procesos poco estudiados y tributa el desarrollo del estado de la cuestión sobre los estudios arquigráficos y la cultura visual en México de principios del siglo XX.

Esta investigación significó un vehículo para reconstruir y reflexionar el pasado historiográfico en su capacidad de albergar memoria y conocimiento, así como espacio que facilita y hace comprensible los complicados mecanismos de construcción de la cultura visual de cualquier sociedad. Se concluye que los modelos de escritura discutidos apelan a formas estéticas, hábitos sociales y costumbres culturales extranjeras que fomentan determinados códigos sociales de pertenencia de

clase excluyentes. El discurso social se relacionó con las temáticas de felicidad, progreso tecnológico y la emulación de utilitarismo, identidad y significación social como libertador, normalizador, asociativo y sistémico orientador en los estilos de vida civilizados como nuevas formas de reproducción del poder colonizador. Los *modelos de escritura* tuvieron un rol relevante en su propagación e influyente en la configuración identitaria moderna en la sociedad tampiqueña; creencias, valoraciones, e ideas se construyeron histórica y socialmente como imágenes de progreso hasta ésta era de hipermodernidad.

## 6. Agradecimientos

Universidad Autónoma de Tamaulipas por el apoyo con la aprobación de registro de este proyecto de investigación.

## Referencias

- [1] E. Ávila, *Tampico, rincones de antiguo esplendor. Edificaciones históricas 1980 y 1930*, (p. 27), 2016.
- [2] A. Laube y M. Widrig, *Archigraphy, Lettering on Buildings*. Buenos Aires, Argentina: Birkhäuser, 2016. <https://doi.org/10.1515/9783035605556>
- [3] S. Karzs, “*La exclusión: concepto falso, problema verdadero*” en S. Kars. (Ed.), *La exclusión: bordeando sus fronteras. Definiciones y Matices*. España: Gedisa, 2000, pp. 133-214.
- [4] P. Greenhalgh, *Modernism and Design*. Londres, Inglaterra: Reaktion Books, 1990, p. 9.
- [5] M. Silva, *Arquitectura y materiales modernos: funciones y técnicas internacionales en la ciudad de México 1900-1910*, Apr. 9, 2021. <http://boletin-cnmh.inah.gob.mx/boletin/boletines/3EV22P181.pdf>



- [6] A. Gramsci, A., *Cartas de la cárcel 1926-1937*. Barcelona, España: Ediciones Península, 2003.
- [7] P. Bourdieu, *El sentido social del gusto. Elementos para una sociología de la cultura*. Buenos Aires: Siglo Veintiuno Editores, 2010.
- [8] N. Pevsner, *Pioneros del Diseño Moderno de William Morris a Walter Gropius*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones Infinito, 2000.
- [9] J. Baudrillard, *Crítica de la economía política del signo*. México: Siglo Veintiuno Editores, 1974.
- [10] S. Hall, *Notas sobre la deconstrucción de lo popular. Historia y teoría socialista, crítica*, 1984, (9), pp. 1-11.
- [11] N. Luhmann, 1998, *Complejidad y Modernidad*. Madrid, España: Ed. Trotta.
- [12] N. García Canclini, *La sociedad sin relato, antropología y estética de la inminencia*. España: Katz Conocimiento, 2010. <https://doi.org/10.2307/j.ctvm7bcb0>
- [13] A. Tapia, *El diseño gráfico en el espacio social*. México: Ed. Designio, 2011.
- [14] J. B. Thompson, *Ideología y cultura moderna, teoría crítica social en la era de la comunicación de masas*, 2002, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- [15] R. Williams, *Cultura, Sociología de la comunicación y del arte*. España: Ediciones Paidós, 1981, pp. 13-18.
- [16] E. Verón, *Prensa gráfica y teoría de los discursos sociales: producción, recepción, regulación. Fragmentos de un tejido*, agosto 2013. Recuperado de <http://semiotica2a.sociales.uba.ar/files/2014/08/Veron-texto-prensa-grafica.pdf>
- [17] Semiótica de Redes, Cátedra Carlón. Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Buenos Aires, 17 de marzo, 2021. <http://semioticaderedes-carlon.com/2021/03/15/glosario/?fbclid=IwAR1QANx6vEFvdlkUrnTzADv5XJZo8N8kPTpke73ZipJD51Ed4rpc0-VPjL8>
- [18] A. Valdivia-Barrios, D. Pinto-Torres, and M. Herrera-Barraza, “Media Literacy and Learning. Conceptual Contribution in the Field of Media Education”, *REE*, vol. 22, no. 2, pp. 1-16, Mar. 2018. <https://doi.org/10.15359/ree.22-2.8>
- [19] J. F. Liernu, *Arquitectura, en teoría escritos 1986-2010*. Buenos Aires, Argentina: Bibliográfica de Voros, S. A., pp. 64-66, 2010.
- [20] K. Lynch, *The Image of the City*. Barcelona, España: Ed. Gustavo Gili, 2008.
- [21] L. Villoro, *Sobre la identidad de los pueblos*. Estado plural, pluralidad de culturas, 2015, pp. 63-68, nov. 3, 2019.

Derechos de Autor (c) 2022 Rebeca Isadora Lozano Castro



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Interfaz gráfica para el control de seguimiento de trayectorias de un robot sanitizador en espacios controlados

## *Graphical interface for the control of the trajectory following of a sanitizing robot in controlled spaces*

Carlos Guillermo Miguélez Machado , Ángel Israel Soto Marrufo , Israel Ulises Ponce Monarrez ,  
Francesco García Luna 

Instituto de Ingeniería y Tecnología IIT, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

**Autor de correspondencia:** Ángel Israel Soto Marrufo, Instituto de Ingeniería y Tecnología IIT, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. E-mail: [angel.soto@uacj.mx](mailto:angel.soto@uacj.mx). ORCID: 0000-0001-6471-9127.

**Recibido:** 15 de Septiembre del 2021

**Aceptado:** 12 de Noviembre del 2021

**Publicado:** 24 de Noviembre del 2021

**Resumen.** –En el presente trabajo se propone un Desarrollo de Interfaz Gráfica de Usuario para la interacción con un modelo de simulación tridimensional de un robot higienizador en una sala simulada para las pruebas de algoritmos de navegación implementados en el mismo. Al mismo tiempo, se implementan los comportamientos de exploración y planificación de rutas de desinfección. El modelo simulado del robot se basa en la Rueda Omnidireccional Nexus 4WOmni de la que también se propone el modelo cinemático. Además, se propone una interfaz gráfica de usuario para dar comandos básicos al robot simulado. Los resultados de la implementación se comprueban mediante la implementación de algoritmos de navegación al robot, también los comportamientos de exploración, planificación de rutas y seguimiento de trayectoria de desinfección e interacción de la interfaz gráfica con la simulación.

**Palabras clave:** Interfaz gráfica de usuario; Robot desinfectante; Modelo simulado del robot; Planificación de trayectorias y seguimiento de trayectorias.

**Abstract.** – In the present work, a Development Graphical User Interface for interaction with a tridimensional simulation model of a sanitizing robot in a simulated room is proposed for navigation algorithms tests implemented on it. At the same time, the behaviors of exploration and disinfection path planning are implemented. The simulated model of the robot is based on the Omnidirectional Nexus 4WOmni Wheel of which the kinematic model is also proposed. Additionally, a graphic user interface to give basic commands to the simulated robot is proposed. The results of the implementation are proved through the implementation of navigation algorithms to the robot, also the behaviors of exploration, path planning, and disinfection trajectory tracking, and interaction of the graphic interface with the simulation.

**Keywords:** Graphic user interface; Sanitizing robot; Simulated model of the robot; Path planning and trajectory tracking.



## 1. Introducción

La pandemia generada por la enfermedad COVID-19 ha planteado la necesidad de hacer un mayor uso de la tecnología para disminuir el contacto de los humanos con la misma [1]. En este contexto, los robots se unen al personal médico en la primera línea, especialmente los robots móviles que utilizan lámparas de luz ultravioleta tipo C (UV-C) para desinfectar locales [2]–[4]. Específicamente, en el sistema de navegación del robot de desinfección con lámparas ultravioletas se necesitan algoritmos de planeación de rutas que garanticen el acercamiento del robot a los objetos a desinfectar [5], [6]. A su vez, el sistema debe ser capaz de gestionar las metas que administra dicho algoritmo al mismo tiempo que deja la opción al usuario de tele operar el robot. Finalmente, se han realizado estudios de la radiación recibida por unidad de área comprobando la eficacia de los sistemas autónomos móviles de desinfección. [7], [8].

Es necesario resaltar, que los proyectos de robótica, por lo general, requieren de alto presupuesto para implementar los algoritmos sobre un robot real. Por lo tanto, es bastante como un plantear resultados iniciales de un proyecto en simulación. Específicamente, en el campo de la navegación de robots móviles, Phunopas e Inoue[9] plantean los resultados de un sistema para corregir la medición de odometría de un robot móvil mediante el uso de la simulación. Por su parte, Nguyen et al. [10] proponen un sistema de navegación autónoma usando aprendizaje por reforzamiento y es probado en un modelo simulado de un robot omnidireccional de 4 ruedas. Los resultados del estudio anterior son presentados en un entorno de simulación en Gazebo y la arquitectura del sistema fue desplegada en Robotic Operating System (ROS). Cabe destacar, las dificultades que enfrentan los autores y los desarrolladores en el uso de los simuladores. Por ejemplo, consumo computacional del simulador,

la fidelidad a la realidad del mismo y la construcción del modelo simulado del robot, constituyen algunas de estas dificultades. En este contexto, los autores Afsal et al. [11] realizaron un estudio de los principales problemas que presentan los motores de simulación actuales mediante encuestas online a desarrolladores y autores en el ámbito de la robótica.

En el presente trabajo se propone una interfaz gráfica de usuario para interactuar con el modelo de simulación de un robot de desinfección con luces ultravioletas. Adicionalmente, se explica la arquitectura de software que incluye el sistema de navegación. Por su parte, el sistema de generación de metas de desinfección es basado en el mapa construido por el robot mediante la exploración autónoma del local. Los resultados de la arquitectura son mostrados en un entorno simulado. Adicionalmente, se plantea el modelo cinemático y la dinámica de los actuadores de la plataforma móvil sobre la cual se intenta implementar el sistema. Es importante definir como limitante, que esta investigación no propone un control de bajo nivel para la generación de las velocidades del robot real, este aspecto se planea tratar en futura investigación. Adicionalmente, aunque se plantea el modelo del robot real a utilizar, no es contenido de esta investigación realizar el levantamiento instrumental de todo el hardware necesario para la puesta en marcha del robot real. El alcance de este trabajo llega hasta el diseño de un entorno simulado para el robot móvil con la tarea de desinfección, al igual que el diseño de una interfaz gráfica de usuario y las pruebas del algoritmo de desinfección sobre distintos mapas de entornos reales y virtuales.

El trabajo se estructura de la siguiente manera, en la sección 2 dos, marco teórico, se cubren los principales conceptos de interés como lo son



ROS, generación de trayectorias y el modelo cinemático y la dinámica de los actuadores. En la sección 3, Materiales y Métodos, se describe la interfaz diseñada para la interacción con el robot a nivel de usuario. En la sección 4, Resultados y Discusión, se plantean los resultados principales del trabajo. Por último, se realizan las conclusiones del mismo.

## 1. Marco Teórico

### 1.1 Plataforma experimental

Los resultados de la implementación del sistema se prueban en un entorno simulado con un modelo de simulación basado en el robot Nexus 4Womni ver figura 1 que posee 4 ruedas omnidireccionales.



Figura 1. Robot Nexus 4Womni utilizado como base para el modelo de simulación del proyecto

### 1.2 Modelo cinemático

Primeramente, se define R como el radio del centro del robot hasta el centro de las ruedas, r como el radio de las ruedas  $w_1; w_2; w_3; w_4$  como las velocidades angulares de cada una de las ruedas y las velocidades  $V_x; V_y; \theta$  como las velocidades en los ejes (x, y) y la velocidad angular del robot [9]. Luego, El modelo cinemático directo viene dado por la ecuación 1

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix} = \frac{r}{2} J \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde

$$J = \begin{bmatrix} -\sin(\pi + \frac{\pi}{4}) & -\sin(\pi + \frac{3\pi}{4}) & -\sin(\pi + \frac{5\pi}{4}) & -\sin(\pi + \frac{7\pi}{4}) \\ \cos(\pi + \frac{\pi}{4}) & \cos(\pi + \frac{3\pi}{4}) & \cos(\pi + \frac{5\pi}{4}) & \cos(\pi + \frac{7\pi}{4}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

A su vez, el modelo cinemático inverso viene dado por la expresión 3

$$\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} = \frac{2}{r} J^T \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 1.3 Modelo dinámico de los Actuadores

Para analizar la dinámica de un motor se toman los siguientes parámetros

Tabla 1. Parámetros del robot y de los motores

Término	Descripción	Valor	Unidad
v	Voltaje de armadura		V
Ia	corriente del motor		A
Ra	resistencia de armadura	1.9	$\Omega$
Ka	constante de torque	$13,4 \times 10^{-3}$	$N \cdot m \left( \frac{Nm}{A} \right)$
Kb	constante de fuerza contra-electromotriz	$13,4 \times 10^{-3}$	$\frac{V - s}{rad}$
Jm	inercia del eje del motor	$5,7 \times 10^{-3}$	$Kgm^2$
Fm(qm)	fricción en el eje del motor	0.001	Nm
re	relación de reducción de engranes	64:1	
$\phi$	ángulo en la rueda i		Rad
T $\phi_i$	torque en la rueda i		Nm

Las ecuaciones que describen el comportamiento del motor son



$$v = i_a R_a + q_{mi} k_b \quad (4)$$

$$\dot{q}_{mi} = r_e c h u_i \quad (5)$$

$$\ddot{q}_{mi} = r_e \ddot{c} h u_i \quad (6)$$

$$T_m = i_a k_a \quad (7)$$

$$J_m \ddot{q}_{mi} = T_m - f_m(\dot{q}_{mi}) - \frac{T_{chi}}{r_e} \quad (8)$$

#### 1.4 Generación de trayectorias

La navegación autónoma requiere de sistemas que permitan generar y seguir la ruta hasta los puntos deseados. Por lo cual, se necesita un planeador global que sea capaz de tomar como entradas el mapa (2D o 3D) del mundo, la postura del robot y la meta deseada, para generar una trayectoria que guiera al robot de su posición y orientación actual a la deseada. Luego, se necesita de un planeador local que tome como entradas el plan global y la percepción que tiene el robot del ambiente, para generar las velocidades lineares y angulares que el mismo deberá alcanzar para seguir el plan global y evitar colisionar con obstáculos [12].

El estado del arte actual de los sistemas de navegación muestra familias extensas de algoritmos tanto de planeadores globales como locales. Las familias más denotadas de planeadores globales incluyen técnicas como grafos de visibilidad, exploración de árboles aleatorios [13], hojas de ruta probabilísticas y funciones de navegación [12]. Mientras que, entre los planeadores locales más destacados se encuentran en enfoque de ventanas dinámicas (DWA) [14], el enfoque de banda elástica (EBand) y el enfoque temporal de la (TEB) [12], [15].

Robotic Operating System (ROS) provee de capacidades de navegación en su colección de paquetes *move base* el cual utiliza planeadores globales y locales. Por consiguiente, corresponde al desarrollador de la aplicación elegir entre los distintos planeadores que ofrece ROS o implementar uno propio, posibilidad que se tiene

por la flexibilidad que ofrece ROS como middleware. Entre los planeadores globales implementados en ROS están *navfn* y *global planner* [16]. A su vez, los planeadores locales de mayor relevancia implementados en ROS son los ya mencionados DWA, EBand y TEB [14], [17], [18].

En aras tomar la elección entre los navegadores más adecuados para la aplicación, Los autores Cybulski1 y Wegierska [15] compararon las implementaciones en ROS de los algoritmos DWA, EBand y Time Elastic Band (TEB) en simulación y en un robot real. Del estudio anterior, los autores concluyeron que DWA posee mayor repetibilidad. Mientras que, EBand posee mayor precisión al arribar a la meta. Por último, en términos de velocidad de acción TEB resultó ser el más rápido. Por otro lado, Pittner et al. [18] realizaron un estudio similar que compara los mismos algoritmos en términos del camino generado comparando su comportamiento en un entorno simulado. La anterior investigación arroja a TEB como el mejor, puesto que DWA tuvo problemas con los obstáculos dinámicos y EBand errores con los obstáculos estáticos. A su vez, Filotheou et al. [12] realizaron una comparación exhaustiva de planeadores teniendo en cuenta la calidad de la documentación existente, el soporte actual (en el año 2020), las facilidades de instalación, la modularidad y la consistencia en el rendimiento. Del estudio anterior, los autores reportaron que los algoritmos *navfn* como planeador global y *teb local planner* como planeador local eran los que mejor cumplan los parámetros antes mencionados.

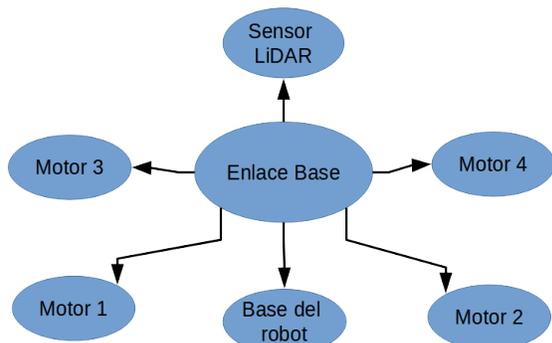
Como muestran los estudios citados en los párrafos anteriores la combinación de *navfn* como planeador global y *teb local planner* como planeador local resulta ser la más adecuada para el sistema de navegación que se necesita en este trabajo.



## 2. Materiales y Métodos

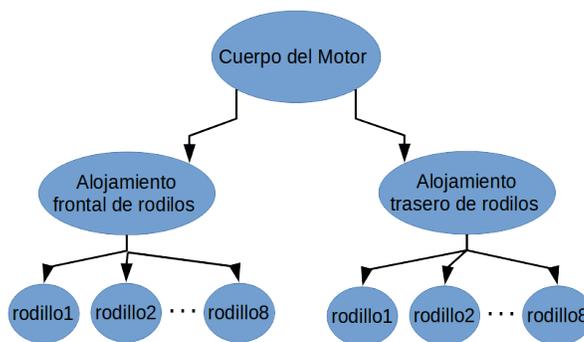
La distribución de ROS empleada en el trabajo es ROS Melodic Morenia cuya fecha de lanzamiento fue el 23 de mayo del 2018 con fecha de caducidad en mayo del 2023. El mismo, se ejecuta sobre la distribución Ubuntu 18.04 Bionic. Adicionalmente, se utilizó Gazebo 9.0.0 para la simulación. La programación se realiza con la versión de Python 3.5 y el procesamiento de imágenes con OpenCV 3.0.

Para la prueba del sistema se construye un modelo simulado de la plataforma móvil y del sensor LiDAR en lenguaje URDF. Este lenguaje descriptivo se basa en xml y básicamente representa el robot mediante diferentes links que se unen entre sí mediante joints. En el esquema de la figura 2 se visualiza las conexiones entre los links del robot.



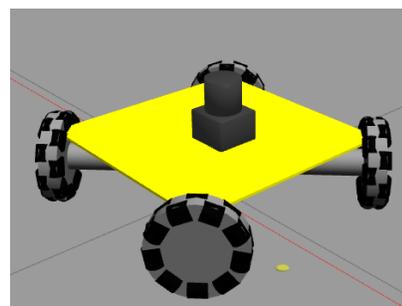
**Figura 2.** Relación entre los diferentes links del modelo simulado en Gazebo del Robot Nexus.

Así mismo, el sistema motor-rueda con rueda es descrito de manera independiente como se muestra en la figura 3. Lo anterior, debido a la complejidad y la cantidad de links que tiene una rueda omnidireccional.



**Figura 3.** Relación entre los diferentes links del sistema motor-rueda del robot en Gazebo.

El resultado de la construcción del modelo simulado del robot se muestra en la figura 4. El modelo del robot se construye con las dimensiones y el peso del robot Nexus mostrado en la figura (figura del robot Nexus). Además, el modelo del sensor LiDAR es construido con las dimensiones, el peso y las características del sensor RPLidar A2. Es decir, con una resolución de 1 grado y 12 metros de alcance.



**Figura 4.** Modelo simulado en Gazebo del Robot Nexus.

### 2.1 Interfaz Gráfica de usuario

Se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) básica con el objetivo de facilitar la interacción con el robot (figura 5). La GUI fue desplegada en un servidor web en la computadora local de trabajo.



Una de las funcionalidades básicas de la GUI es la comunicación con el robot, para lo cual, se utiliza un cuadro de entrada de texto en donde se introduce el IP y el puerto del robot (figura 5). El botón de conectar realiza la conexión con el robot, que en este caso es el modelo simulado que se encuentra en la misma máquina de trabajo, o sea, localhost:9090. Adicionalmente, se cuenta con un botón para solicitar al robot una exploración del entorno de trabajo y un botón para solicitar al robot que trace y siga la ruta de desinfección.

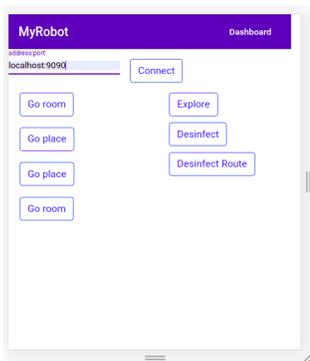


Figura 5. Interfaz gráfica de usuario pantalla frontal.

Además, se brinda al usuario la posibilidad de ingresar su propia meta introduciendo el grupo de datos coordinados (x,y,z,roll,pitch,yaw) como se muestra en la figura 6. En este mismo control, se cuenta con otra pestaña donde se pueden visualizar todas las metas creadas por el usuario, así como las opciones de eliminar o editar dichas metas.

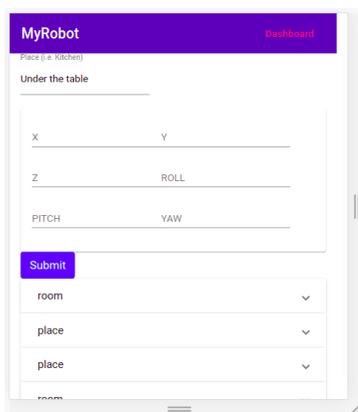


Figura 6. Interfaz gráfica de usuario pantalla de añadir metas manualmente.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Análisis de Interfaz Gráfica de usuario

La interfaz gráfica desarrollada con herramientas web de software abierto brinda la ventaja de ser escalable. Similarmente a lo propuesto, Sooryavanshi P et al. [19] desarrollan interfaz web mediante la implementación de Node.js en la computadora de su robot. La arquitectura propuesta por Sooryavanshi P contiene tanto la visual como la lógica de servidor lo que la hace más compacta pero más dependiente de la conexión con el dispositivo. Sin embargo, una arquitectura como la propuesta en el presente trabajo con *API Rest* en el robot desacoplada de una *Single Page Application* garantiza que el usuario no dependa completamente de la conexión con el robot para interactuar con la interfaz, lo anterior constituye un aporte. En términos de modularidad e integración, Cruz R et al. [20] proponen una arquitectura humano-robot desacoplada con posibilidad de integrar nuevos dispositivos. Sin embargo, utilizan un HMI el cual no es un elemento que le incorpora robustez, pero encarece el producto. En la propuesta realizada en este trabajo se pretende alcanzar la compatibilidad con cualquier dispositivo móvil sin necesidad de integrar un elemento industrial.

Por otra parte, en términos de usabilidad Ily M. y Magid E. [21] desarrollan una interfaz gráfica con un alto número de funcionalidades en comparación con las propuestas en este trabajo. Así mismo muestran mucha más información interna del robot. Sin embargo, el objetivo de los autores de este trabajo es el desarrollo de una interfaz para usuarios básicos con poco o ningún conocimiento de robótica, por lo cual, la sencillez de la interfaz propuesta.



Con respecto al uso de tecnologías avanzadas, la propuesta realizada se basa en tecnologías web modernas y con sostenibilidad. Aun así, autores como Miatliuk K. [22] proponen un diseño conceptual de control mental del dispositivo mediante la lectura de ondas cerebrales. Así mismo, Gego D. [23] propone algo similar pero mediante el seguimiento de la pupila del ojo del usuario. En términos de tecnología los trabajos de Miatliuk y Gego resultan más avanzados, aunque los mismos se encuentren en etapa conceptual. También, es válido cuestionar si el encarecimiento del producto y la aceptación por parte de un usuario final hacen factible el uso de dicha tecnología. De igual manera, otros trabajos enriquecen la interacción humano-robot mediante comandos de voz [24]–[26]. Dicha tecnología, ha tenido aceptación en los usuarios y resulta cómoda. Por lo anterior, se propone el enriquecimiento de la propuesta actual con módulos de comandos de voz.

### 3.2 Análisis del algoritmo de *Desinfect\_Router*

Primeramente, se construyó una habitación en simulación (figura 7) para poner a prueba el funcionamiento del sistema de navegación del modelo simulado del robot. Mediante la interfaz de usuario se comanda la exploración de dicha habitación y se ordena al robot que vaya a una meta específica entrada manualmente.

Seguidamente, Se realizó un algoritmo de autogeneración de metas mediante la identificación de contornos sobre el mapa 2D para generar una serie de metas que cubren la mayor parte de los objetos a ser desinfectados en el espacio de trabajo. La subrutina del algoritmo se activa una vez presionado el botón *Desinfect Route*. Finalmente, el seguimiento de trayectorias se realiza mediante la utilización del planeador local Time Elastic Band (TEB). A continuación, se presentan los resultados de dicho algoritmo, primero el mapa generado mediante una

habitación simulada, luego en diversos mapas de habitaciones reales.

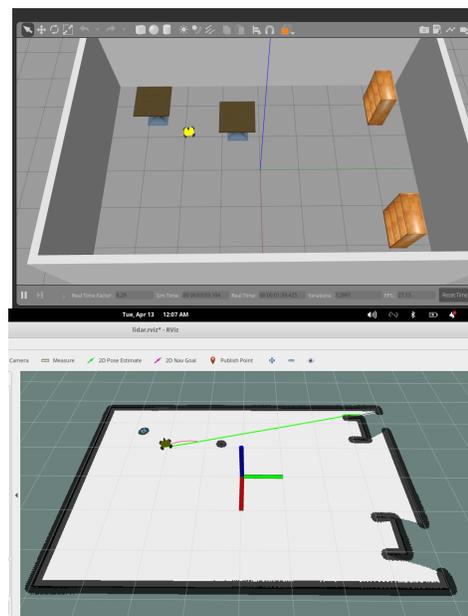


Figura 7. Habitación simulada construida (arriba visa en el simulador Gazebo, abajo vista en Rviz).

La figura 8 representa el algoritmo de autogeneración de metas sobre el mapa de la habitación simulada de la figura 7. La elección del algoritmo de planeamiento local TEB se realizó siguiendo la comparación realizada en [18]. El mismo se aplica de tal manera que se logra la autonomía en el seguimiento de ruta. Otras soluciones han sido el uso de inteligencia artificial en la navegación [27]. Los resultados en términos de eficiencia en la navegación resultaron similares. Pero, la complejidad de la implementación es mayor. Otras aproximaciones con respecto al control de bajo nivel ha sido la aplicación de técnicas de control avanzado [28][29][30]. Dichas soluciones son muy acertadas para un robot real y se propone la aplicación de las mismas en este trabajo en un futuro cercano.

Otra aproximación sería la de usar control teleoperado para mover el robot desde un punto remoto [31]. Sin embargo, esto obliga al



usuario a estar pendiente del proceso, y no resulta conveniente para la aplicación propuesta. Una aproximación más intensiva a la propuesta en este trabajo es la mezcla del mundo virtual simulado con la realidad para lograr ciertos patrones en el control de movimiento del robot [32]. Igualmente, la aproximación anterior requiere la atención de un operador. Por último, una aproximación muy similar a la propuesta de utilizar la simulación y la visualización en el desarrollo, es la desarrollada por Zea A. y Hanebeck D [33]. En la misma proponen un sistema similar a RViz pero en dispositivos móviles.

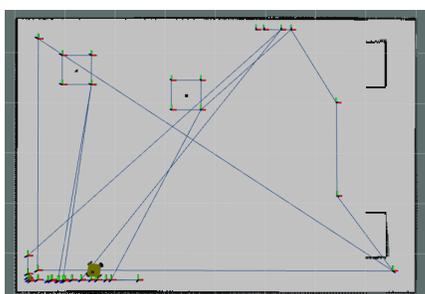


Figura 8. Metas generadas en la habitación simulada mediante el algoritmo de auto generación de metas.

### 3.3 Resultados sobre mapas construidos a partir de habitaciones reales

La figura 9 representa una habitación cuadrada (arriba sin obstáculos en el centro, abajo con obstáculos). Como se observa, el algoritmo dispone metas en el centro de la habitación cuando esta tienen posibles objetos a desinfectar.

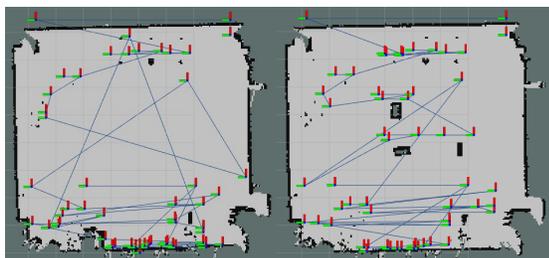


Figura 9. Relación entre los diferentes links del sistema motor rueda del robot en Gazebo.

La figura 10 representa habitaciones con una geometría más complicada. Se aprecia como el algoritmo coloca metas incluso en el exterior de la habitación. Aun así, dichas metas serán rechazadas por el planeador al no encontrar una ruta que conlleve a ellas.

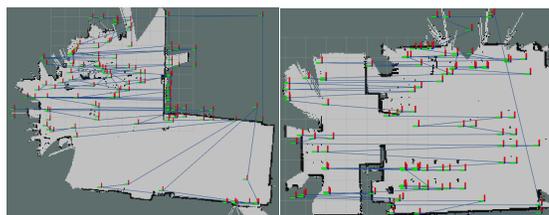


Figura 10. Metas generadas por el generador automático de metas en habitaciones de geometría compleja

La figura 11 arriba representa a el comportamiento del algoritmo sobre un mapa incompleto y abajo sobre un mapa con una geometría complicada con obstáculos en dispuestos en todo el mapa.

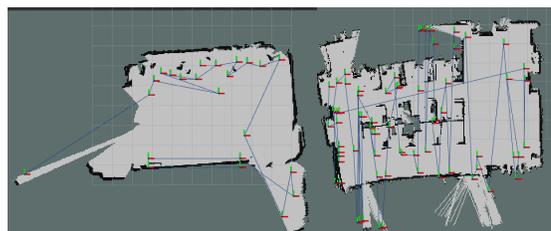


Figura 11. Metas generadas en una habitación no explorada completamente (arriba) y en una habitación de geometría complicada con obstáculos grandes en el centro

Similarmente al trabajo desarrollado con el planificador de rutas autónomo Desinfect Route, los autores (Ruan, K y, Zehao, Q, 2021) [34] plantean un robot para la desinfección autónoma que puede ser tele operado por el usuario y afirman implementar un método para la planificación de rutas autónoma. Sin embargo, no se especifica cómo se escogen las metas autónomamente. Por otra parte, los autores (Hu D. et al. 2020) [35] utilizan una cámara 3D y un algoritmo de segmentación de la nube de puntos para elegir autónomamente



las metas en el entorno para desinfectar, la desventaja de la solución propuesta es el requerimiento de sensores mucho más costosos que los necesarios en la solución propuesta en este trabajo.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una interfaz de usuario gráfica para la interacción con un robot de desinfección ultravioleta. Además, se desarrolló un algoritmo de trazado de ruta de desinfección basado en los contornos del mapa previamente explorado. Finalmente, lo se puso a prueba el sistema en un entorno de simulación y visualización construido.

La interfaz de usuario es novedosa en esta área del conocimiento por la arquitectura de API REST que desacopla el robot de la interface y por la simpleza para el usuario. La misma se probó mediante el envío de comandos a un modelo del robot en una habitación simulada. Adicionalmente, se desarrolló el algoritmo de identificación de contornos para generar automáticamente las metas resulta una alternativa a los sistemas propuestos. Dicho algoritmo se probó en el mapa de la habitación simulada y en diversos mapas de habitaciones reales. Resultando el comportamiento del algoritmo mejor en habitaciones que tienden a ser cuadradas que en habitaciones con geometría más compleja. El algoritmo requiere de la utilización del sensor LiDAR que no resulta tan costoso como una cámara 3D. Finalmente, dicho algoritmo también se prueba que se puede aplicar a habitaciones parcialmente exploradas en cuyo caso el algoritmo solo coloca metas en terreno conocido.

El presente trabajo es implementarle en un robot real como el propuesto en la sección 2, requiriendo, además, de un sensor LiDAR para su correcta implementación. Sin embargo, para un mejor reconocimiento y desinfección del terreno

se recomienda la mejora del sistema con una cámara 3D. La implementación del trabajo es aplicable en entornos hospitalarios y en entornos hogareños para la desinfección en general mediante radiación ultravioleta.

Como trabajo futuro a corto plazo se implementará el sistema en el robot real, para la interacción con la interfaz de usuario y la puesta en marcha en entornos reales.

#### 5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la beca CONACyT para estudiantes y realizada como parte de la Maestría en Tecnología del Instituto de Ingeniería y Tecnología de la UACJ, Ciudad Juárez, Chihuahua.

#### 6. Reconocimiento de autoría

*Carlos Guillermo Miguélez Machado:* Escritura, Borrador Original, Investigación, Metodología. *Ángel Israel Soto Marrufo:* Revisión, Supervisión, Análisis matemático, Metodología. *Israel Ulises Ponce Monarrez:* Revisión, Supervisión, Administración, Edición. *Francesco García Luna:* Revisión Supervisión, Administración, Edición.

#### Referencias

- [1] D. Conte, S. Leamy, and T. Furukawa, "Design and Map-based Teleoperation of a Robot for Disinfection of COVID-19 in Complex Indoor Environments," 2020 IEEE Int. Symp. Safety, Secur. Rescue Robot. SSR 2020, pp. 276-282, 2020. <https://doi.org/10.1109/SSRR50563.2020.9292625>.
- [2] W. Chanprakon, P., Sae-Oung, T., Treebupachatsakul, T., Hannanta-Anan, P., Piyawattanametha, "An Ultra-violet sterilization robot for disinfection," 5th Int. Conf. Eng. Appl. Sci. Technol., vol. 5, pp. 44-47, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEAST.2019.8802528>



- [3] A. Ray and H. Ray, "PSLB: Portable Sanitization Locomotive Bot," 2020 4th Int. Conf. Electron. Mater. Eng. Nano-Technology, IEMENTech 2020, 2020.  
<https://doi.org/10.1109/IEMENTech51367.2020.9270096>
- [4] A. Vyshnavi, A. Manasa, C. Hamsika, and P. Shalini, "UV Disinfection Robot with Automatic Switching on Human Detection," EAI Endorsed Trans. Internet Things, vol. 6, no. 23, p. 166364, 2020. <https://doi.org/10.4108/eai.25-9-2020.166364>
- [5] D. Hu, H. Zhong, S. Li, J. Tan, and Q. He, "Segmenting areas of potential contamination for adaptive robotic disinfection in built environments," Build. Environ., vol. 184, no. June, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107226>
- [6] M. A. V. J. Muthugala, S. M. B. P. Samarakoon, M. M. Rayguru, B. Ramalingam, and M. R. Elara, "Wall-following behavior for a disinfection robot using type 1 and type 2 fuzzy logic systems," Sensors (Switzerland), vol. 20, no. 16, pp. 1-22, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20164445>
- [7] A. E. M. de Alba, M. B. Rubio, M. E. Morán-Diez, C. Bernabéu, R. Hermosa, and E. Monte, "Microbiological evaluation of the disinfecting potential of UV-C and UV-C plus ozone generating robots," Microorganisms, vol. 9, no. 1, pp. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9010172>
- [8] L. Tiseni, D. Chiaradia, M. Gabardi, M. Solazzi, D. Leonardis, and A. Frisoli, "UV-C Mobile Robots with Optimized Path Planning: Algorithm Design and On-Field Measurements to Improve Surface Disinfection against SARS-CoV-2," IEEE Robot. Autom. Mag., vol. 28, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1109/MRA.2020.3045069>
- [9] A. Phunopas and S. Inoue, "Motion Improvement of Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robots for Indoor Terrain," Proc. Int. Conf. Artif. Life Robot., vol. 22, no. 4, pp. 607-612, 2017. <https://doi.org/10.5954/ICAROB.2017.GS3-1>
- [10] V. N. T. Thanh et al., "Autonomous navigation for omnidirectional robot based on deep reinforcement learning," Int. J. Mech. Eng. Robot. Res., vol. 9, no. 8, 2020. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.9.8.1134-1139>
- [11] A. Afzal, D. S. Katz, C. Le Goues, and C. S. Timperley, "A Study on the Challenges of Using Robotics Simulators for Testing," 2020. Accessed: Apr. 11, 2021. [Online]. Available: <https://discourse.ros.org>.
- [12] A. Filotheou, E. Tsardoulis, A. Dimitriou, A. Symeonidis, and L. Petrou, "Quantitative and Qualitative Evaluation of ROS-Enabled Local and Global Planners in 2D Static Environments," J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl., vol. 98, no. 3-4, pp. 567-601, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01086-y>
- [13] I. Noreen, A. Khan, K. Asghar, and Z. Habib, "A path-planning performance comparison of RRT\*-AB with MEA\* in a 2-Dimensional Environment," Symmetry (Basel), vol. 11, no. 7, 2019. <https://doi.org/10.3390/sym11070945>
- [14] B. Tang, K. Hirota, J. Wang, Y. Dai, and Z. Jia, "An Improved Dynamic Window Approach for Intelligent Pedestrian Avoidance of Mobile Robot," 2020. Accessed: Apr. 06, 2021. [Online]. Available: <https://iscia2020.bit.edu.cn/docs/20201114080545836985.pdf>.
- [15] B. Cybulski, A. Wegierska, and G. Granosik, "Accuracy comparison of navigation local planners on ROS-based mobile robot," in 12th International Workshop on Robot Motion and Control, RoMoCo 2019 - Workshop Proceedings, 2019, pp. 104-111. <https://doi.org/10.1109/RoMoCo.2019.8787346>
- [16] A. A. Gelan, "AUTONOMOUS SEARCH AND RESCUE ROBOT USING ROS PLATFORM," NEAR EAST UNIVERSITY, 2019. <http://docs.neu.edu.tr/library/6813958828.pdf>



- [17] H. Q. T. Ngo, V. N. Le, V. D. N. Thien, T. P. Nguyen, and H. Nguyen, "Develop the socially human-aware navigation system using dynamic window approach and optimize cost function for autonomous medical robot," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 12, 2020. <https://doi.org/10.1177/1687814020979430>
- [18] M. Pittner, M. Hiller, F. Particke, L. Patiño-Studencki, and J. Thielecke, "Systematic analysis of global and local planners for optimal trajectory planning," 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8470582>
- [19] P. Sooryavanshi, S. Uppanlawar, and A. Bhosle, "Implementation of node.js server on Raspberry pi to control a remote vehicle for defense use," in *Proceedings of the International Conference on Intelligent Sustainable Systems, ICISS 2017*, Jun. 2018, pp. 816-819. <https://doi.org/10.1109/ISS1.2017.8389290>
- [20] R. Cruz, L. Garrote, A. Lopes, and U. J. Nunes, "Modular software architecture for human-robot interaction applied to the InterBot mobile robot," in *18th IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2018*, Jun. 2018, pp. 17-23. <https://doi.org/10.1109/ICARSC.2018.8374154>
- [21] M. Ily, L. Roman, and E. Magid, "Development of a graphical user interface for a crawler mobile robot servosila engineer," in *Proceedings - International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE*, Feb. 2019, vol. 2018-Septe, pp. 192-197. <https://doi.org/10.1109/DeSE.2018.00044>
- [22] K. Miatliuk, A. Nawrocka, K. Holewa, and V. Moulianitis, "Conceptual Design of BCI for Mobile Robot Control," <https://doi.org/10.3390/app10072557>
- [23] D. Gego, C. Carreto, and L. Figueiredo, "Teleoperation of a mobile robot based on eye-gaze tracking," *Jul.* 2017. <https://doi.org/10.23919/CISTI.2017.7975673>
- [24] Y. H. Chen and K. T. Song, "Voice control design of a mobile robot using shared-control approach," in *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2017*, Nov. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 105-110. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8122586>
- [25] S. Sharan, T. Q. Nguyen, P. Nauth, and R. Araujo, "Implementation and testing of voice control in a mobile robot for navigation," in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Jul. 2019, vol. 2019-July, pp. 145-150. <https://doi.org/10.1109/AIM.2019.8868892>
- [26] S. Pleshkova, Z. Zahariev, and A. Bekiarski, "Development of Speech Recognition Algorithm and LabView Model for Voice Command Control of Mobile Robot Motio," Dec. 2018. <https://doi.org/10.1109/HiTech.2018.8566257>
- [27] G. Bai, L. Liu, Y. Meng, W. Luo, Q. Gu, and J. Wang, "Path Tracking of Wheeled Mobile Robots Based on Dynamic Prediction Model," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 39690-39701, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2903934>
- [28] S. Morales, J. Magallanes, C. Delgado, and R. Canahuire, "LQR Trajectory Tracking Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot," Dec. 2018. <https://doi.org/10.1109/CCRA.2018.8588146>
- [29] T. Tongloy, S. Chuwongin, K. Jaksukam, C. Chousangsunton, and S. Boonsang, "Asynchronous deep reinforcement learning for the mobile robot navigation with supervised auxiliary tasks," in *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering, ICRAE 2017*, Feb. 2018, vol. 2017-Decem, pp. 68-72. <https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291355>
- [30] A. L. Saleh, M. A. Hussain, and S. M. Klim, "Optimal Trajectory Tracking Control for a Wheeled Mobile Robot Using Fractional Order PID



Controller," J. Univ. Babylon Eng. Sci., vol. 26, no. 4, pp. 292-306, Feb. 2018. <https://doi.org/10.29196/jubes.v26i4.1087>

[31] D. Kiryanov and R. Lavrenov, "Remote Control Application for 'Servosila Engineer' on Android Mobile Devices," Proc. Int. Conf. Artif. Life Robot., vol. 25, no. February, pp. 440-443, 2020. <https://doi.org/10.5954/ICAROB.2020.OS18-4>

[32] M. Wu, S. L. Dai, and C. Yang, "Mixed reality enhanced user interactive path planning for omnidirectional mobile robot," Appl. Sci., vol. 10, no. 3, p. 1135, Feb. 2020. <https://doi.org/10.3390/app10031135>

[33] A. Zea and U. D. Hanebeck, "IVIZ: a ROS visualization app for mobile devices," arXiv, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2021.100057>

[34] K. Ruan, Z. Wu, and Q. Xu, "Smart cleaner: A new autonomous indoor disinfection robot for combating the covid-19 pandemic," Robotics, vol. 10, no. 3, 2021. <https://doi.org/10.3390/robotics10030087>

[35] D. Hu, H. Zhong, S. Li, J. Tan, and Q. He, "Segmenting areas of potential contamination for adaptive robotic disinfection in built environments," Build. Environ., vol. 184, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107226>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Dispositivo de movilidad urbana para usuarios de sillas de ruedas en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)

## *Urban mobility device for wheelchair users in the Metropolitan Area of the Valley of Mexico (ZMVM)*

Israel Garduño-Bonilla<sup>1</sup> , Emilio Martínez de Velasco y Arellano<sup>1</sup> , Ana Lilia Laureano-Cruces<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Posgrado en Diseño y Desarrollo de Productos, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180 Col. Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, Ciudad de México, México

<sup>2</sup>Departamento de Sistemas, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180 Col. Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, Ciudad de México, México

**Autor de correspondencia:** Israel Garduño Bonilla, Posgrado en Diseño y Desarrollo de Productos, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad-Azcapotzalco, Ciudad de México, México. Email: [al2201800475@azc.uam.mx](mailto:al2201800475@azc.uam.mx). ORCID: 0000-0001-5395-1369.

**Recibido:** 14 de Agosto del 2021      **Aceptado:** 25 de Noviembre del 2021      **Publicado:** 9 de Diciembre del 2021

**Resumen.** Las personas con discapacidad son un sector importante de la población que necesita movilizarse en la Zona Metropolitana del Valle de México, para trabajar, asistir a la escuela o realizar actividades cotidianas. El objetivo del trabajo consiste en diseñar el prototipo de un dispositivo de movilidad urbana independiente, adaptable a sillas de ruedas de uso cotidiano. Para ello, fue utilizado como método el Modelo General del Proceso de Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana, elegido por ser adecuado para el diseño y desarrollo de productos. Como resultado se obtuvo el prototipo funcional escala 1:1, con la propuesta de integrarse en estaciones del transporte público.

**Palabras clave:** Discapacidad; Sillas de ruedas; Dispositivo electromecánico para silla de ruedas; Movilidad urbana.

**Abstract.** People with disabilities are important sector of the population that needs to mobilize in the Metropolitan Area of the Valley of Mexico, to work, attend school or carry out daily activities. The objective of the work is to design the prototype of an independent urban mobility device, adaptable to wheelchairs for everyday use. For this, was used as a method the General Model of the Design Process of the Universidad Autónoma Metropolitana, chosen for being suitable for the design and development of products. As a result, was obtained a functional prototype 1: 1 scale, with the proposal to integrate in public transport stations.

**Keywords:** Disability; Wheelchairs; Electromechanical wheelchair device; Urban mobility.



## 1. Introducción

La población con discapacidad permanente es un sector que tiene diversas clases de necesidades, como aparatos ortopédicos, atención médica y psicológica, medicamentos, terapias, y transportes adaptados, sólo por mencionar algunas.

Según datos reportados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en el último censo del año 2020 en México el total de la población es de 120, 014, 024 habitantes, de este total el 16.5% (20, 838, 108) tiene al menos una discapacidad o limitación en la actividad cotidiana [1].

En relación con la distribución de la población con discapacidad, según la actividad cotidiana que no puede ser realizada, el porcentaje más alto lo tienen las personas que no pueden caminar y subir o bajar escaleras utilizando sus pies, esto es el 47.6% [1].

Considerando estas cifras de la discapacidad, se hace evidente la importancia de evaluar tanto las necesidades como las problemáticas de esta población y aportar soluciones que promuevan una mejor calidad de vida y de igualdad.

La movilidad urbana es una de estas necesidades importantes de las Personas con Discapacidad (PcD), además de ser un indicador de las condiciones sociales económicas y políticas del país [2].

El proyecto tiene como objetivo desarrollar el prototipo funcional de un dispositivo de movilidad urbana, para usuarios<sup>1</sup> de sillas de ruedas, que se transportan en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), para trabajar, asistir a la escuela o realizar actividades deportivas y recreativas.

Un aspecto esencial de este trabajo, fue analizar las condiciones de las personas que usan sillas de ruedas para transportarse en la ZMVM y detectar sus necesidades para aportar soluciones que ayuden a mejorar los problemas de movilidad en el entorno urbano.

Para determinar estas necesidades de los usuarios en relación con su movilidad urbana, fueron aplicadas encuestas en línea con el objetivo conocer los destinos de la movilidad, primordialmente, interesa conocer si los usuarios viajan en la ZMVM para: trabajar, estudiar, realizar alguna actividad deportiva o recreativa, además de obtener información del tiempo y distancia estimado de cada traslado.

La encuesta en línea también sirvió como medio de contacto para realizar entrevistas a los usuarios y obtener así, categorías cualitativas de necesidades que podría resolver el dispositivo de movilidad urbana.

Con base en las categorías de necesidades fue aplicado como método el *Modelo General del Proceso de Diseño* de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)[3], con el objetivo de fabricar un prototipo funcional, el cual que fue diseñado y manufacturado por la Fábrica de Sillas de Ruedas Lince S.A. de C.V.

El propósito del desarrollo de este dispositivo es incrementar la movilidad urbana de los usuarios de sillas de ruedas en la ZMVM, con la propuesta de incluirse en algunas estaciones del transporte público, como Metrobus, Mexibus, Metro y Tren ligero y mediante el desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles, pueda ser prestado a los usuarios y monitoreado por los administradores de los dispositivos de movilidad.

<sup>1</sup> Para el proyecto las personas con discapacidad que utilizan sillas de ruedas de manera cotidiana fueron denominados como usuarios, de tal

manera, cada vez que se mencione usuarios se estará haciendo referencia a estas personas.



## 2. Justificación

La ZMVM está formada por 16 Alcaldías de la Ciudad de México<sup>2</sup> (CDMX), 59 Municipios Conurbados del Estado de México (MCEM) y 1 del Estado de Hidalgo, con una población que asciende los 20 892 724 de habitantes, abarca alrededor de 7 866 km<sup>2</sup> [4] y es el centro económico, financiero, político y cultural de México [5].

Según datos de la Gaceta Oficial del Distrito Federal publicada en octubre del 2014, bajo el marco del *Programa Integral de Movilidad 2013-2018* en su diagnóstico reporta que la ZMVM es:

la tercera aglomeración urbana más grande del mundo y la más grande de México, con una población aproximada de 21 millones de habitantes. En ella se concentra el 17.9% de la población nacional y se genera aproximadamente el 22.4% del Producto Interno Bruto (PIB) del país [6].

En referencia al porcentaje de residencia de la población con discapacidad por entidad federativa, el 16.4% se encuentran en el Estado de México y el 5.8% en la CDMX, ambas están dentro de las siete entidades federativas donde se concentra prácticamente la mitad de la población con discapacidad residente en el país (49.6%)[7].

Para el desarrollo de proyecto se consideró esta zona por varias circunstancias, primeramente, por la concentración de población con discapacidad, además de ser una zona complicada por su densidad poblacional, con todas las problemáticas que esto conlleva, como el transporte público insuficiente e inaccesible para PcD, la contaminación del aire, escases de

agua, inundaciones en ciertas colonias, altos índices de violencia, entre muchos más.

Cabe señalar que estas problemáticas del entorno se agravan cuando las personas tienen alguna incapacidad o limitación para realizar actividades como caminar o subir y bajar escaleras.

En mayo del 2016 la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), emitió un documento titulado *Diagnóstico sobre la situación de las personas con discapacidad en México* [8], en donde se reportaba lo siguiente:

- El Consejo Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) indicó que el 54.1% de las personas con discapacidad se encontraban en **condición de pobreza** en 2014, cifra superior a la tasa de prevalencia de la pobreza a nivel nacional (46.2%).
- Las personas con discapacidad presentaron tasas de prevalencia superiores a los resultados nacionales en carencia por **rezago educativo** (51.1% contra 18.7%), carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda (24.6% contra 21.2%) y carencia de acceso a la alimentación (31.1% contra 23.4%); mientras que presentaron menor incidencia por carencia por acceso a los servicios de salud (16.4% contra 18.2%), carencia por acceso a la seguridad social (42.9% contra 58.5%) y carencia por calidad y espacio de la vivienda (10.7% contra 12.3%).
- De acuerdo con la Encuesta Nacional sobre la Discriminación en México (ENADIS) realizada en el 2010, las principales menciones de problemas que enfrentan son el **desempleo** (27.5%), la **discriminación** (20.4%) y el **no poder ser autosuficientes** (15.7%), en menor proporción la falta de apoyo gubernamental,

<sup>2</sup> A partir de febrero del 2016 el Diario Oficial de la Federación (DOF) publica el Acuerdo General del Pleno del Consejo de la Judicatura Federal para cambiar la denominación de Distrito Federal por Ciudad de México

en todo su cuerpo normativo de la Federación. En algunos casos se citarán datos que corresponde al Distrito Federal, pero es por que en el año de la publicación no había realizado ese cambio, sin embargo, se debe entender que la referencia a Distrito Federal es la misma que Ciudad de México (CDMX).



salud, *problemas de movilidad*, respeto a sus derechos e inseguridad.

- En relación a las barreras que enfrentan para poder desarrollar plenamente sus derechos sociales y humanos se encuentran las vinculadas a la *participación en el mercado de trabajo* y con ello, la obtención de ingresos para satisfacer sus necesidades. Esto se deriva en gran parte por un *acceso deficiente a la educación*, aspecto que debilita la obtención de mayores niveles educativos y dificulta integrarse en los mercados laborales que demandan mayor preparación y especialización.
- En promedio los hogares en donde algún familiar tiene alguna discapacidad, *gastan mensualmente* más en rubros de medicamentos, atención hospitalaria y salud que los hogares sin familiares con discapacidad.
- El efecto derivado de los problemas en México, es el bajo desarrollo humano para una *vida independiente*. Esta situación, se traduce en una dependencia hacia los núcleos familiares, lo que finalmente crea barreras físicas, sociales y económicas que les excluyen de una sociedad igualitaria.
- Las personas con discapacidad pueden *no insertarse en el mercado de trabajo* por varias razones. En primera instancia, encontramos que el salario al cual están dispuestas a tomar un empleo puede ser más alto, debido a que tienen que enfrentar una serie de obstáculos como la carencia de infraestructura que garantice su *accesibilidad en el sistema de transporte* y en el lugar de trabajo, entre otros; además de los costos asociados a la propia búsqueda de trabajo.

Los puntos de este diagnóstico realizado por la SEDESOL, por un lado, hacen evidentes los problemas y condiciones adversas de la población discapacitada, pero otro, pueden ser percibidos como áreas de oportunidad para el desarrollo de proyectos tecnológicos que aporten recursos para solucionar estas necesidades.

### 3. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo fue utilizada la metodología de la investigación tecnológica, la cual está definida como un proceso complejo que integra la lógica de la invención, el diseño y la innovación [9].

Bajo el marco metodológico de la investigación tecnológica, cuya finalidad es modificar la realidad mediante la investigación y la transformación, fue utilizado el *Modelo General del Proceso de Diseño* UAM (Figura 1), con el objetivo de diseñar y fabricar el prototipo de un dispositivo adaptable a sillas de ruedas de uso cotidiano, para incrementar la movilidad urbana de los usuarios en la ZMVM.

El modelo consta de cinco etapas: 1) caso de estudio, 2) definición del problema, 3) hipótesis alternativas de solución, 4) desarrollo del proyecto y 5) realización.



**Figura 1.** Modelo General del Procesos de Diseño UAM integrado en el marco de la Metodología de la investigación.

### 3.1 Caso de estudio

El proyecto consideró como caso de estudio a personas que utilizan de manera cotidiana sillas de ruedas para transportarse en la ZMVM, para realizar actividades habituales como asistir al trabajo, a la escuela o bien actividades deportivas y recreativas.

En la primera y segunda etapa del modelo UAM, fue hecha la revisión bibliográfica y de datos estadísticos para conocer algunas de las condiciones de las PcD, parte de estos aspectos ya fueron mencionados en la justificación, sin embargo, para este trabajo era importante detectar específicamente aspectos relacionados con la movilidad urbana y las necesidades los usuarios.

Para ello, fue elaborado un cuestionario de aplicación en línea y con el apoyo de la Fábrica de sillas de ruedas Lince S.A. de C.V. se logró contactar a 400 personas que utilizan sillas de ruedas para realizar actividades cotidianas.

A este grupo de personas, les fue enviado el cuestionario y la autorización de consentimiento de participación, así como el aviso de confidencialidad y resguardo de la información. El objetivo del cuestionario fue obtener un diagnóstico de las PcD en relación con las siguientes categorías:

1. Datos generales.
2. Discapacidad y grado de movilidad corporal.
3. Movilidad urbana y tipo de actividad.
4. Transporte público y entorno urbano.
5. Gastos en relación a la discapacidad.

En el primer apartado de datos generales, fue solicitada la edad, sexo, estado civil, lugar de residencia, tipo de actividad realizada, número de años con la discapacidad y datos antropométricos como estatura y peso, con la intención de obtener el perfil socioeconómico.

Para el segundo punto fue importante conocer el grado de movilidad corporal del usuario, ya que esto indica la condición de independencia de la PcD. Si el usuario tiene movilidad en tórax y miembros superiores como brazos, hombros, manos y cabeza, se puede inferir que su movilidad es de nivel medio-alto, lo cual denota que la persona tiene mayor oportunidad de transportarse en la ZMVM solo o con ayuda mínima.

El siguiente rubro de movilidad urbana y tipo de actividad esta relacionada con las labores que realizan los usuarios para lo cual necesitan transportarse, ya sea para ir al trabajo, la escuela o bien para actividades familiares o recreativas.

En el tercer apartado las preguntas del cuestionario son concernientes a dos aspectos, uno es el tipo de transporte público utilizado por los usuarios dentro de la ZMVM y el otro es acerca de las condiciones del entorno, como son la vías primarias y secundarias. La intención en



este punto es detectar algunas barreras del entorno con las que se encuentran los usuarios.

Para el último punto del cuestionario era importante conocer algunos aspectos económicos, principalmente los gastos relacionados con la discapacidad, como son terapias, medicamentos, ayudas técnicas, gastos médicos y de transporte.

En cuanto al número de cuestionarios respondidos, se obtuvo la participación de 80 personas, de los cuales fueron elegidos 57 para ser analizados, debido a que cumplían con dos aspectos esenciales: residencia dentro de la ZMVM y grado de movilidad corporal medio-alto.

Cabe mencionar que el instrumento no se encuentra validado, sin embargo, la información recabada fue de gran importancia para el diseño del dispositivo.

### ***3.2 Definición del problema***

Las problemáticas a las que se enfrentan las personas que utilizan sillas de ruedas, son de diversa índole; se tienen problemáticas personales ocasionadas por el tipo de lesión o discapacidad, que afecta el grado de movilidad corporal y con ello la capacidad de transportarse de manera independiente.

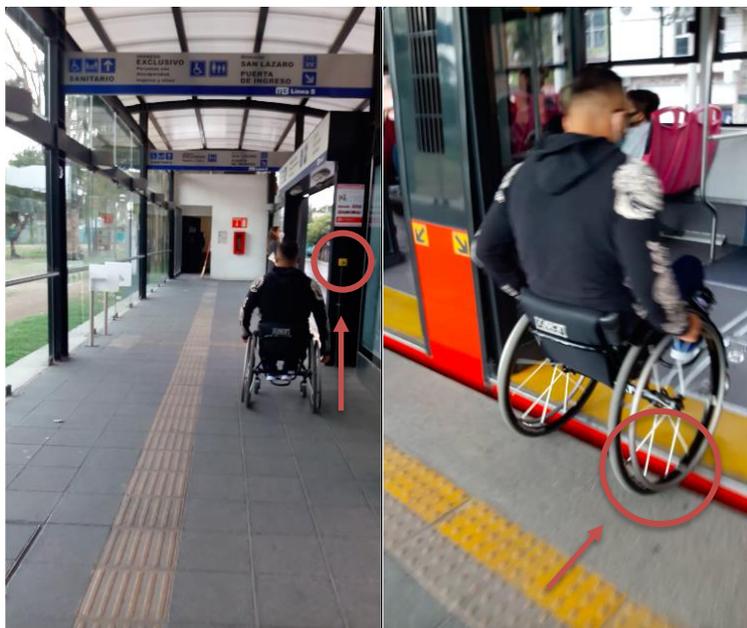
Existen también problemáticas relacionadas con el entorno, como es la falta de rampas, acceso inadecuado en edificios, baños, escuelas, salas de concierto, cines, además de pavimentos en mal estado, con baches, topes y banquetas invadidas por el comercio informal.

El acceso al transporte público es otra problemática del entorno ya que la mayoría no tiene elementos adaptados para que una persona en silla de ruedas pueda utilizarlo de manera independiente. Generalmente los autobuses urbanos y colectivos son inaccesibles para usuarios de sillas de ruedas.

El transporte público con más adaptaciones para personas con discapacidad es el sistema de Autobús de Tránsito Rápido (BRT, Bus Rapid Transit). Este sistema fue desarrollado con el objetivo satisfacer necesidades de transporte de los usuarios, ofreciendo mayor calidad y mayor accesibilidad [10].

Entre estos elementos de accesibilidad [11] están las rampas que se encuentran en la entrada de cada estación, botones de aviso al operador del autobús para indicar que subirá una persona con discapacidad y así el autobús pueda acercarse más a la plataforma para reducir el espacio entre el autobús y el piso de la estación (Figura 2).

Estos elementos de accesibilidad del BRT resuelven algunas problemáticas importantes, sin embargo, en el interior del autobús los usuarios se enfrentan a problemas relacionados con la falta de respeto a los espacios destinados para las PcD, ya que las personas que utilizan también el transporte público ocupan estos lugares.



**Figura 2.** Botón de aviso al conductor para indicar que subirá un usuario en silla de ruedas o con alguna discapacidad. De esta manera el conductor estará enterado de la situación y acercará más la unidad para reducir la distancia entre el piso del autobús y la plataforma de la estación.

Otro problema relacionado con el viaje en el BRT, es la saturación de personas, ya que, en horas de mayor afluencia no es posible abordar con silla de ruedas y es necesario esperar varios autobuses con menor cantidad de gente para poder entrar.

### 3.3 Hipótesis alternativas de solución.

Para el Modelo General de Diseño UAM, las hipótesis alternativas de solución son propuestas de diseño que pueden satisfacer la necesidad y para ello, necesitan ser evaluadas con la finalidad de seleccionar la más adecuada.

Considerando las problemáticas y las necesidades de movilidad urbana de los usuarios y las características tanto del transporte urbano como las condiciones desfavorables de las vialidades primarias y secundarias de la ZMVM, fue planteada una matriz de decisión, con varias alternativas que podrían ayudar a resolver la problemática.

A continuación, se presenta la Tabla 1 con estas propuestas de solución, que en el Modelo UAM son denominadas hipótesis alternativas de solución.

**Tabla 1.** Matriz de propuestas de solución a las problemáticas de movilidad urbana en usuarios de sillas de ruedas.

Propuesta	Necesidad 			
	Accesible	Banquetas, topes y baches	Aumentar movilidad	Económico
1. Automóvil adaptado	✗	✓	✓	✗
2. Automóvil diseño exclusivo	✓	✓	✓	✗
3. Transportes públicos adaptados	✗	✓	✓	✓
4. Dispositivo adaptable a la silla de ruedas	✓	✓	✓	✓



El automóvil adaptado fue la **primera** alternativa considerada, debido a que un vehículo modificado con rampas para el ingreso del usuario con silla de ruedas y con adaptaciones al volante para el manejo, resulta ser una solución adecuada para una persona que necesita transportarse distancias mayores a 1 kilómetro y con la necesidad de llevar su silla de ruedas.

Sin embargo, esta alternativa no fue seleccionada ya que el costo de adquirir el vehículo, realizar las modificaciones y proporcionar el mantenimiento, hace que esta opción en la parte económica sea demasiado elevada.

El aspecto económico es un tema importante ya que, como se mencionó, un porcentaje significativo de la población con discapacidad no tienen empleo fijo o ingresos que cubran en su totalidad gastos personales y familiares.

La **segunda** alternativa fue analizada principalmente como un objeto nuevo, en el que se tuviera completa libertad de diseño para resolver las problemáticas, no obstante, el tema económico continuaba siendo la limitante pues el diseño de un automóvil, ya sea con motor de combustión interna o eléctrico, resulta ser elevado.

Como ejemplo de este tipo de vehículos se encuentra el Elbee, que fue diseñado y fabricado por la empresa Elbee Mobility [12] de República Checa. Elbee es un automóvil muy pequeño (2.47 m de largo x 1.33 m de ancho y 1.72 m de alto), el cual está habilitado con un mecanismo de acceso por la parte delantera, que despliega una rampa para tener acceso con la silla de ruedas.

De esta forma el usuario puede acceder fácil y cómodamente, además al ingresar de esta manera y al cerrar la rampa, los controles se colocan al frente de la persona para que pueda conducir.

Este producto es comercializado en algunos países de Europa como Francia, Italia, Inglaterra y República Checa. En cuanto al costo de este vehículo, en la publicación online del noticiero ERONEWS de septiembre del año 2014, el costo del automóvil era de 15 000 euros.

Reflexionando acerca de este factor económico, la **tercer** alternativa discutida y evaluada, fue sugerir transportes públicos adaptados para la discapacidad y con diversas rutas, en las que pudieran ser abordadas por usuarios de sillas de ruedas o con otro tipo de discapacidad. Esto con la intención, por un lado, de economizar en cada traslado y por otro, apoyarse de experiencias realizadas en otros países en relación al transporte urbano y la discapacidad.

Una de estas experiencias revisadas fue la situación del vehículo llamado *auto-rickshaw* (Figura 3), que es utilizado en la provincia de Sind en Pakistán tanto para el transporte de personas adultas con alguna discapacidad o deficiencia física y niños con discapacidad, con la intención de promover su asistencia a la escuela.

Los *auto-rickshaws* son una opción de transporte motorizado de tres ruedas, habitualmente utilizado ya sea por una persona o por un grupo de pasajeros a la vez. Debido a la carencia de transporte público accesible, las personas con deficiencias físicas recurren a estos vehículos porque tienen un piso bajo y pueden llevar una silla de ruedas plegada y un acompañante [13].

En esta misma provincia de Pakistán, también han sido propuestos vehículos individuales para facilitar el transporte de personas que no pueden caminar por alguna discapacidad y que necesitan asistir al trabajo o a la escuela.



**Figura 3.** Auto Rickshaw utilizado en la provincia de Sind en Pakistán, para el transporte de personas con discapacidad. Imagen con permiso de reproducción sin fines de lucro, tomada de: ACCES EXCHANGE INTERNATIONAL, (2018).

Tomando en cuenta la necesidad particular de la población en esta región, han sido fabricados triciclos (Figura 4) con el principio básico de una bicicleta para ser autopropulsado con las manos y los brazos.

Sin embargo, se ha reportado que estos triciclos no son del todo eficientes ya que tienen problemas de diseño que dificultan el desempeño óptimo[13]. No obstante, esta opción continúa desarrollándose porque es calificada como viable para la población de esta región.

del entorno y las anteriores propuestas, se formula la **cuarta** hipótesis alternativa de solución. La alternativa consiste en el desarrollo de un dispositivo adaptable a la silla de ruedas, con la capacidad de movilizar al usuario en el entorno urbano, considerando el peso del usuario y las condiciones de las vialidades primarias y secundarias.

El dispositivo fue planteado para ser de fácil acoplamiento y compatible con la mayoría de las sillas de ruedas de uso cotidiano.



**Figura 4.** Triciclo diseñado y fabricado en la provincia de Sind en Pakistán, utilizado por personas que tienen dificultad en los miembros inferiores y que tienen la necesidad de asistir al trabajo o a la escuela. Imagen con permiso de reproducción sin fines de lucro, tomada de: ACCES EXCHANGE INTERNATIONAL, (2018).

Ahora bien, reconociendo y analizando la complejidad de las necesidades de movilidad urbana de las PcD, además de las problemáticas

En este aspecto es necesario señalar y hacer énfasis en esta característica del dispositivo, ya que no está contemplado el acoplamiento a sillas



de ruedas ortopédicas, debido a que éstas son diseñadas y fabricadas exclusivamente para traslados en distancias cortas, por ello son muy útiles en hospitales y centros médicos. Este tipo de sillas no tienen la suficiente rigidez estructural para poder ser utilizadas en el pavimento de las calles, sin embargo, por economía o desconocimiento muchas PcD las utilizan como silla de ruedas de uso cotidiano.

Para movilizar al usuario con la silla de ruedas, el dispositivo está provisto de un sistema mecánico estrella-cadena articulado al mecanismo de dirección, con ello, la persona puede auto-propulsarse utilizando la fuerza de sus brazos y manos, además posibilita el control de la dirección por medio de un manubrio integrado.

Reconociendo que no todos los usuarios tienen la fortaleza o capacidad de autopropulsión, el dispositivo incluye un motor eléctrico conectado a una batería para asistir al usuario durante el viaje en el momento deseado. En caso de no ser requerido el sistema eléctrico, el dispositivo acoplado a la silla podrá ser manipulado de forma manual.

Esta última alternativa fue considerada óptima ya que, por un lado, es un sistema individual e independiente, y por otro, el dispositivo podría instalarse en estaciones de transporte BTR y ser utilizado por los usuarios de sillas de ruedas para trasladarse en las calles de colonias aledañas o inclusive utilizar el dispositivo para viajar de una estación a otra en horarios de saturación de los autobuses.

Con base en la premisa del dispositivo independiente y la inserción en el transporte público, se pretende incrementar la movilidad de los usuarios de sillas de ruedas en la ZMVM.

Debido a la complejidad de esta alternativa, será necesario establecer etapas de desarrollo y además solicitar apoyo de tres principales actores

de la sociedad: la **universidad**, la **iniciativa privada** y el sector **gobierno**. Lo anterior con la intención de tener soluciones desde las posibilidades y experiencias de cada sector, para resolver problemáticas complejas de movilidad urbana.

### 3.4 Desarrollo del proyecto.

La primera etapa consistió en diseñar y fabricar un prototipo de acoplamiento a la silla de ruedas, que, por un lado, incrementara la movilidad del usuario de una manera independiente y por otro, fuera económicamente accesible a la población con discapacidad mediante la inclusión del dispositivo en las estaciones del Metrobus y Mexibus.

La segunda etapa está proyectada en desarrollar los elementos necesarios para la inclusión del dispositivo de movilidad en las estaciones del transporte público. Para ello, se propone que el dispositivo sea colocado en las estaciones BRT y ser prestado a los usuarios de sillas de ruedas para que puedan desplazarse en las calles aledañas o bien transportarse algunas estaciones, evitando así los problemas de subir al autobús en horas de mayor saturación, en donde hay mucha gente y no hay espacio para poder subir con la silla de ruedas.

Cabe señalar que, para el caso de este documento, será presentada la primera etapa del proyecto, en conjunto con el planteamiento para el funcionamiento de la segunda.

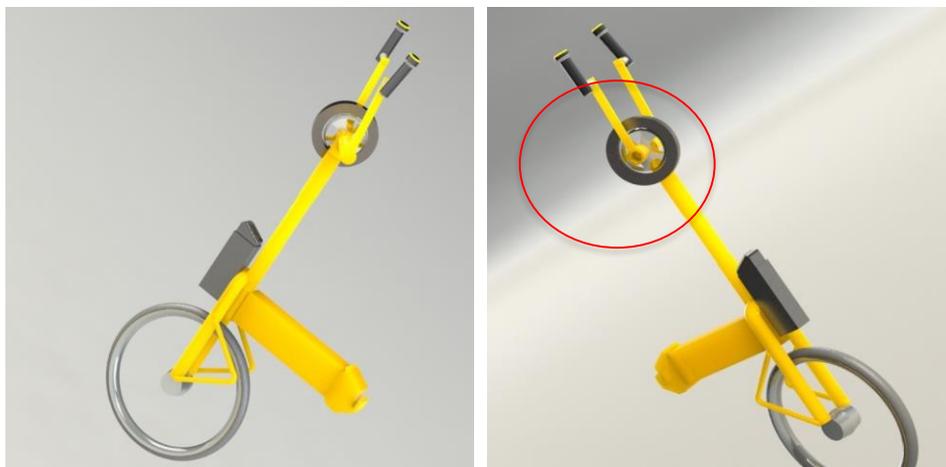
Para el desarrollo del proyecto fue necesario definir tanto los aspectos de forma del dispositivo, como los de funcionamiento e integrarlos, de la tal manera que pudieran acoplarse a la estructura la silla de ruedas y así poder ser utilizado por el usuario.

El dispositivo de movilidad urbana (Figura 5) consiste en un sistema híbrido (mecánico-eléctrico) que ayudará al desplazamiento del



usuario de dos maneras: 1) autopropulsado y 2) por medio de un motor eléctrico.

Para el sistema eléctrico, fue necesario utilizar una batería de Litio que suministrara la carga eléctrica tanto al motor como a los controladores.



**Figura 5.** Propuesta de dispositivo híbrido (mecánico-eléctrico) para la movilidad de personas con discapacidad que utilizan sillas de ruedas de forma cotidiana.

Para la autopropulsión, el dispositivo incluye un mecanismo de estrella-cadena para la transmisión de movimiento, que se conecta directamente a una rueda neumática de 16 pulgadas de diámetro y a un manubrio para que el usuario pueda sujetarlo y mediante la fuerza de los músculos de los miembros superiores como brazos, antebrazos, espalda y abdomen, el usuario pueda moverse empleando menor cantidad de fuerza y con mejor control de manejo.

Este modo de autopropulsión posibilita al usuario para realizar actividad física durante el desplazamiento; esta propuesta fue incluida debido a que una persona en silla de ruedas tiene mayores probabilidades de presentar obesidad debido a la poca movilidad [14] y a una alimentación inadecuada [15].

Como segunda modalidad, el dispositivo está provisto de un motor eléctrico en el eje de la rueda neumática y conectado a controladores electrónicos para manipular las Revoluciones Por Minuto (RPM) y así acelerar o frenar el dispositivo.

Este tipo de batería fue seleccionada principalmente por que el Litio es un metal altamente electropositivo, que produce celdas de alto voltaje[16]. Debido a estas características la batería del dispositivo tiene la autonomía de viaje entre 20 y 25 kilómetros; en esta distancia el usuario podrá desplazarse utilizando únicamente el sistema eléctrico.

Otro factor considerado en la opción de uso con motor eléctrico para el desplazamiento, fue tener en cuenta que el usuario podría quedarse sin carga en la batería, ya sea por actividad o por falta de suministros eléctricos, sin embargo, esto no sería un motivo para que no funcionara el dispositivo, ya que puede utilizar el sistema de **autopropulsión**.

Estas dos opciones del dispositivo, son alternativas elegibles para el usuario, siempre y cuando los niveles de carga eléctrica de la batería se encuentren en rangos de funcionamiento. Aunque el usuario también podría elegir realizar parte del viaje combinando las dos formas.



Para la estructura del dispositivo fue seleccionada la aleación 6061-T6; este material es una aleación no ferrosa, elaborada principalmente a base de aluminio y adicionada con silicio 0.4-0.8%, cromo 0.04-0.35%, magnesio 0.8-1.2% y cobre 0.15-0.4%. Tiene buenas propiedades mecánicas, excelente maquinabilidad, resistente a la corrosión, su densidad es 2.7 gm/cc y su valor de dureza en escala Brinell es de 95BHN [17].

Esta aleación 6061-T6 llamada comercialmente como **Duraluminio**, es utilizada en diversas aplicaciones como automóviles, edificios, muebles, tuberías y estructuras [18]. La condición T6 indica un tratamiento térmico que produce un valor máximo de 310 MPa de **Esfuerzo Último a la Tensión** (Ultimate Tensile Strength, UTS) y un valor de 276 MPa como **Límite de Fluencia en Tensión** (Yield Tensile Strength, YTS) [19].

En cuanto al sistema de acoplamiento a la silla de ruedas, éste fue habilitado con mecanismos de trinquete para garantizar la facilidad del ensamble y minimizar así la posibilidad de falla. La contraparte del mecanismo de trinquete, es colocado en la estructura de la silla de ruedas de tal forma que sujeción sea realizada en la parte frontal, para permitir al usuario una mejor manipulación y acoplamiento.

Es importante señalar que el sistema de anclaje es una parte crítica del diseño ya que debe soportar los esfuerzos estáticos y dinámicos generados tanto por el propio peso del usuario, como los producidos por las condiciones del pavimento cuando se desplaza el usuario en el dispositivo de movilidad urbana.

Debido a estas condiciones el mecanismo ha sido reforzado estructuralmente y además el trinquete, al ser un sistema de acoplamiento sencillo reduce las posibilidades de falla.

Cuando el usuario quiera desacoplar el dispositivo de movilidad, lo podrá realizar liberando el trinquete por medio de una palanca y resortes, de tal forma que se facilite también la liberación de este mecanismo y así no provoque complicaciones de uso.

### 3.5 Realización

Para la fabricación del prototipo físico fueron realizados dibujos y bocetos de la propuesta de diseño, con la intención de comunicar ideas de forma, funcionamiento y dimensiones.

Una vez definido el diseño general y los mecanismos, se procedió a utilizar el software Inventor Profesional de Autodesk versión 2019 (Licencia Educativa), para modelar el prototipo con sus ensambles y sub ensambles (Figura 6).

Con este mismo software de Autodesk, se realizaron animaciones de los mecanismos y ensambles, para verificar ajustes, acoplamientos e intersecciones, además se elaboraron los planos generales y de detalle, necesarios para el proceso de fabricación (Figura 7). Para ello fue necesario definir algunos parámetros como la potencia del motor, RPM, corriente y voltaje de alimentación.

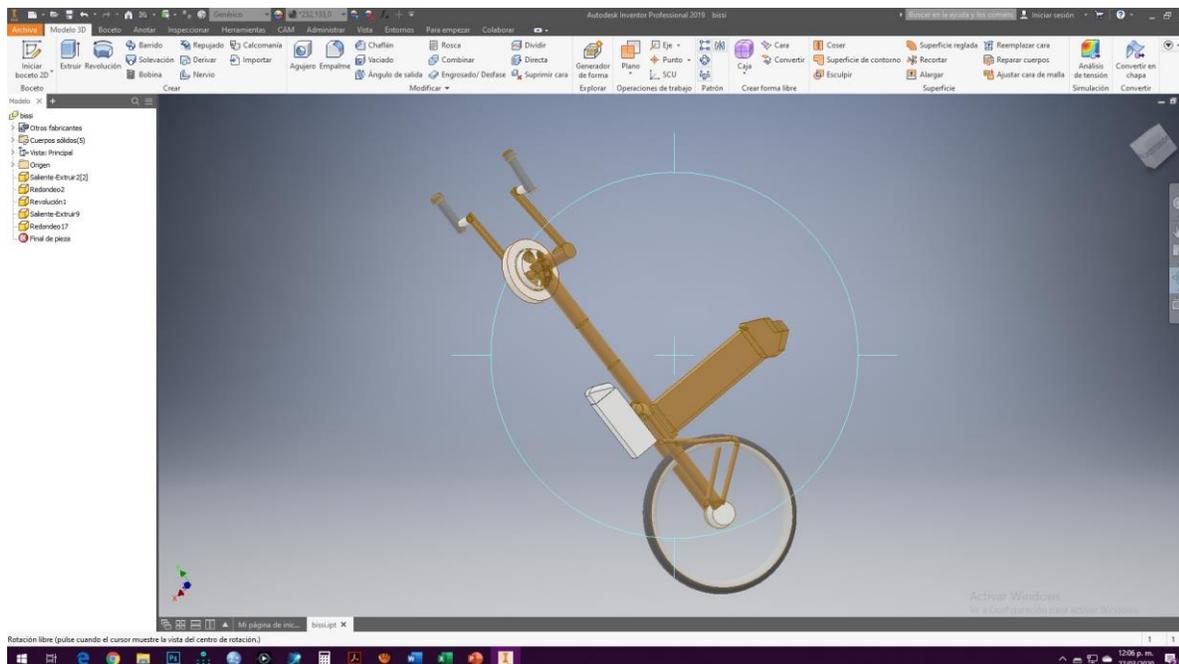


Figura 6. Modelo virtual elaborado para la fabricación del prototipo.

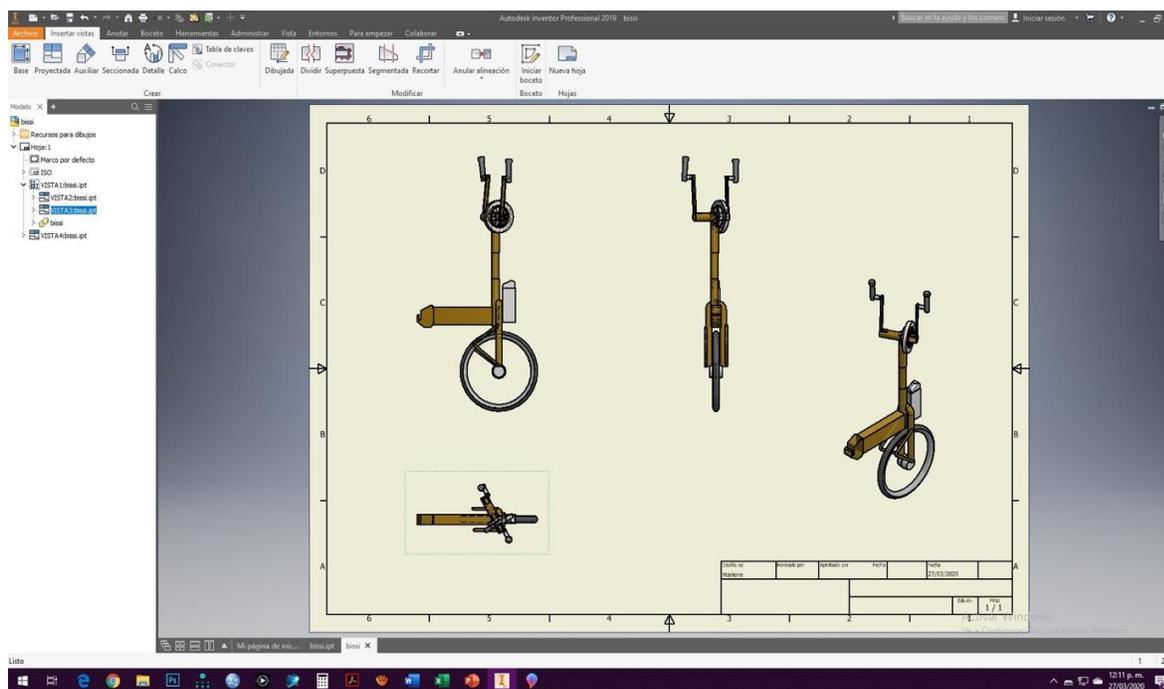


Figura 7. Planos generales y de detalle del dispositivo de movilidad urbana para usuarios de sillas de ruedas.

Otro aspecto importante de la fabricación, fue realizar algunos cálculos para el diseño del prototipo, los cuales fueron centrados en dos

aspectos importantes: la transmisión del movimiento y la resistencia de la estructura.



En cuanto a la estructura, el cálculo fue centrado en los esfuerzos normales, cortantes, de torsión y deformaciones, considerando algunas variables como el peso del usuario, cargas dinámicas y estáticas debidas a las condiciones del terreno y la velocidad del vehículo.

Una vez determinados los materiales a emplear y en conjunto con los parámetros de diseño, fueron definidos los siguientes procesos de manufactura necesarios para fabricar el prototipo. En la Figura 8 se muestra el diagrama de los procesos y la continuidad de producción, iniciando con la solicitud de materiales y terminando con la revisión final del prototipo.

La manufactura del prototipo fue realizada por la fábrica de sillas de ruedas Industrias Lince por ROE-MEX S.A. de C.V. Esta empresa mexicana fue fundada hace 30 años con la intención de producir en México sillas de ruedas deportivas y solucionar algunas de las problemáticas relacionadas con la discapacidad motriz. Con el paso del tiempo y la adquisición de

sillas de ruedas de uso cotidiano y otras ayudas técnicas como bastones, andaderas, adaptaciones para la conducción de automóviles, entre otros.

Cabe mencionar que la empresa cuenta con el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIECYT); este registro es una base de datos y una plataforma informática que contiene la información sobre las empresas, instituciones y personas físicas con actividad empresarial, mediante el cual es posible solicitar apoyos en el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para realizar proyectos de investigación tecnológica.

Con base en la experiencia de la empresa y con el trabajo de investigación desarrollado, fue fabricado el primer prototipo, el cual se muestra en la Figura 9.

Además de los elementos expuestos en párrafos anteriores, este prototipo incluye dos soportes en los costados, con la intención de permitir que el dispositivo se encuentre estable y firme cuando

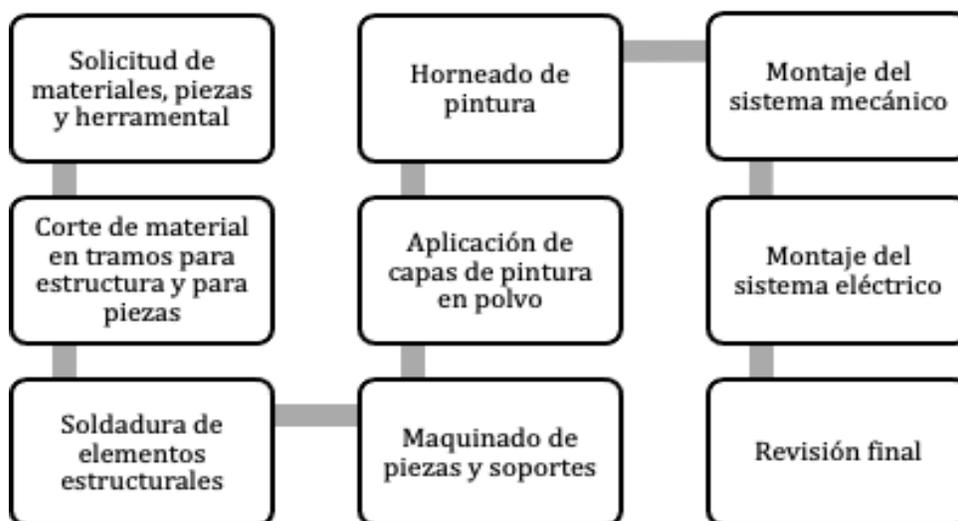


Figura 8. Procesos de manufactura necesarios para la fabricación del prototipo.

experiencia en la fabricación de este producto y en las necesidades de la población con discapacidad, se comienzan a diseñar y fabricar

no esta en uso, facilitando así el acoplamiento (figura 10) en el momento del iniciar el uso o



también para desacoplarse, cuando se quiera dejar de usar.



**Figura 9.** Prototipo del dispositivo de movilidad urbana para usuarios de sillas de ruedas. **Fuente:** Imagen proporcionada y reproducida con autorización de Industrias Lince S.A. de C.V

De tal forma que estos soportes apoyen al usuario para manipular mejor los mecanismos de anclaje y así asegurar la unión entre la silla de ruedas y el dispositivo.

### 3.5.1 Señalamientos de vialidad y sistemas de seguridad.

Debido a que el dispositivo circulará principalmente por vialidades primarias y secundarias, es necesario que sea visible tanto para los vehículos como para los peatones, para ello se consideró integrar señales auditivas y visuales.

Para las auditivas fue adaptado un claxon, con el objetivo de alertar o avisar de su circulación a su alrededor; para las señales visuales fueron colocados en la silla de ruedas y en el dispositivo, viniles adhesivos reflejantes en lugares que

fueran visibles y que además tuvieran movimiento, ya que se ha encontrado que las ayudas visuales en movimiento pueden aumentar la capacidad de los conductores para detectar a ciclistas por la noche [20].

En la parte frontal del dispositivo fue instalada



**Figura 10.** Prototipo del dispositivo de movilidad urbana acoplado a una silla de ruedas de uso cotidiano. **Fuente:** Imagen proporcionada y reproducida con autorización de Industrias Lince S.A. de C.V.

una lámpara con dos funciones principales: 1) iluminar el camino en caso de no tener buen alumbrado artificial y 2) funcionar como señalamiento visual para ser observado cuando el dispositivo circula en las vialidades primarias y secundarias. Esta lámpara está conectada a la llave de encendido, para que de manera automática funcione al utilizar el dispositivo.

Como otro elemento de visibilidad para los vehículos y peatones, se integra un banderín de 1.5 metros de longitud, para que pueda ser identificado a varios metros de distancia, sin importar que se encuentre en un nivel más bajo que un automóvil.

Otro componente de seguridad para el usuario, es el cinturón de seguridad, el cual está unido a la estructura de la silla de ruedas y sujetará a la persona a la altura de la cintura, sin embargo,



dependiendo del tipo de lesión posiblemente será necesario también considerar sujetar las piernas, debido a que se viajará a velocidades entre los 5 y los 30 km es importante asegurar las extremidades inferiores.

### 3.5.2 Propuesta de integración del prototipo en estaciones del Metrobus y Mexibus

Debido a que el propósito de este proyecto es incrementar la movilidad urbana en personas discapacitadas que usan sillas de ruedas, la propuesta a continuar desarrollando es colocar los dispositivos en las estaciones de Metrobus y Mexibus, para que los usuarios puedan hacer uso de ellos y trasladarse mayor distancia, ya que utilizarían el transporte público en los trayectos más largos y para moverse en las calles emplear el dispositivo de movilidad urbana.

De manera inicial se propone colocar los dispositivos en las estaciones de Metrobus (Figura 11), debido a que tienen más elementos de accesibilidad a usuarios de sillas de ruedas, como rampas con la pendiente adecuada, señalización, lugares específicos para la silla y puertas amplias para el ascenso y descenso.

Dentro de la planeación arquitectónica de la red vial del Metrobus, fueron contempladas las estaciones con espacios amplios para la circulación peatonal y áreas verdes. Tomando estas características y las de accesibilidad, los dispositivos de movilidad urbana podrían colocarse en estos espacios, posiblemente en algunas estaciones será necesario hacer modificaciones, pero serán mínimas.

El lugar destinado para colocar los dispositivos debe tener una estructura, que puede ser metálica, para que el dispositivo permanezca hasta que el usuario llegue y haga uso de él, también habilitado con suministro de corriente eléctrica para que la batería pueda recargarse.

### 3.5.3 Sistemas digitales para el uso de los dispositivos de movilidad urbana

Además de las modificaciones en las estaciones del Metrobus, también será necesario desarrollar sistemas digitales que controlen el préstamo y tiempo de uso de los dispositivos de movilidad urbana. Para ello, se propone diseñar una **aplicación digital** (app) para instalarse en dispositivos móviles que tengan conexión a



**Figura 11.** Vistas esquemáticas del dispositivo en la estación del Metrobus. **Fuente:** Imágenes tomadas y modificadas por Tadeo Morales Zamora.



internet como teléfonos celulares y tabletas digitales.

Para poder descargar la aplicación digital será necesario introducir datos generales, como nombre completo, clave de INE, edad, género, correo electrónico, domicilio, tipo de la lesión, tiempo con la lesión y parámetros biométricos como huella digital y reconocimiento facial (Figura 12). La app estará disponible para sistemas iOS y Android y podrá descargarse de manera gratuita en las tiendas de *Playstore* y *App Store*.

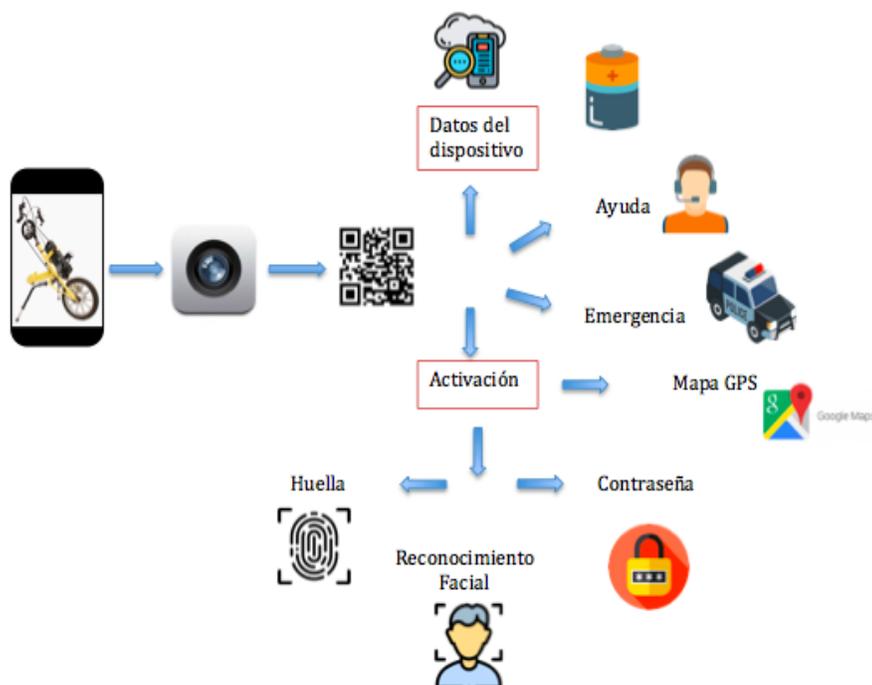
Al ingresar a la aplicación aparecerá la pantalla de inicio, en ella aparecerá la imagen del dispositivo de movilidad, logotipos de la empresa, Metrobus, gobierno de la ciudad, del estado de México y un botón que habilitará la cámara del teléfono para escanear el Código QR (Código de Respuesta Rápida, Quick Response), el cual enlazará los datos del dispositivo como número de serie, nivel de carga de la batería,

fecha y hora de la última revisión por parte del personal de mantenimiento (Figura 13).

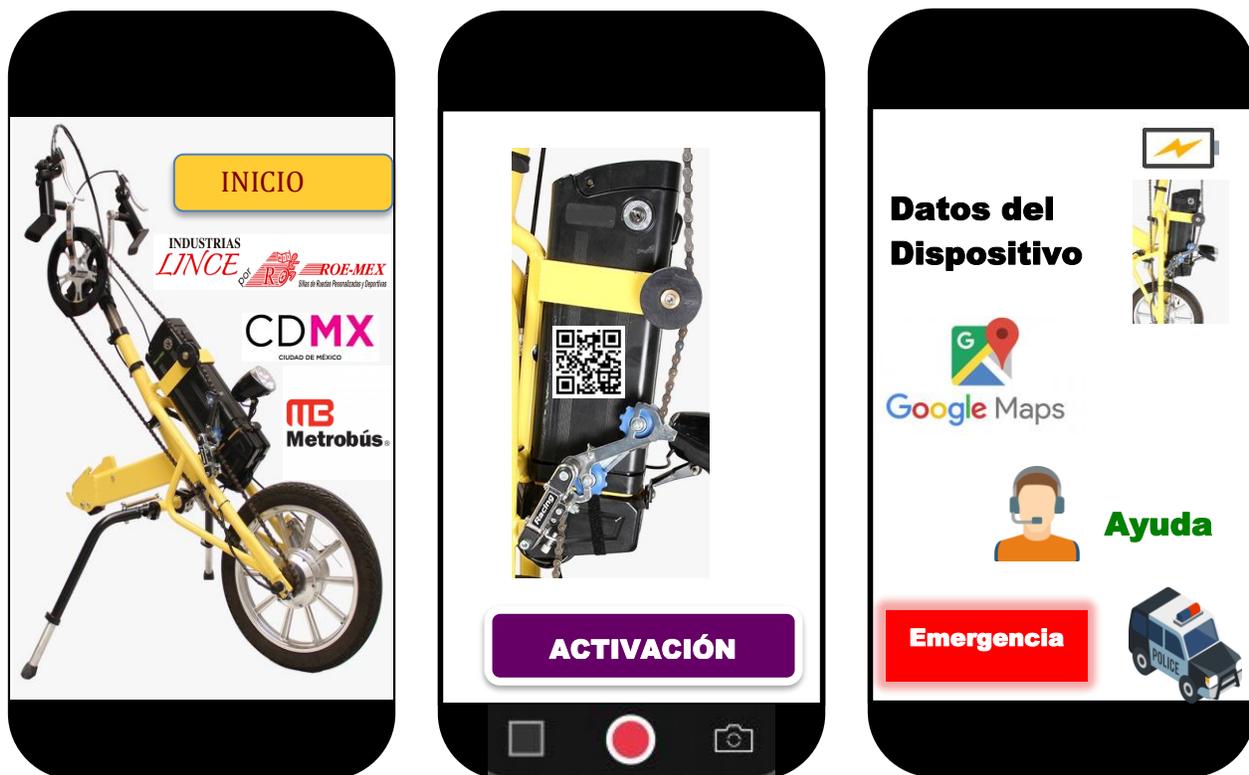
En esa misma pantalla estará ubicado un botón para activar el uso del dispositivo de movilidad, el cual se hará por medio de contraseña, identificación de huella o reconocimiento facial.

Estas opciones estarán habilitadas dependiendo del tipo de teléfono del usuario, si este tiene los medios digitales como lector de huella y cámara frontal podrá tener acceso a esas opciones, en caso de no ser así, con ingresar la contraseña alfanumérica establecida en la descarga de la aplicación, podrá usarse el dispositivo de movilidad.

Por medio de la activación se realizará el desbloqueo del dispositivo de movilidad y automáticamente se liberará un seguro del motor eléctrico y de todo el sistema.



**Figura 12.** Descripción de las funciones de la aplicación del Dispositivo de Movilidad urbana. Fuente: elaboración propia.



**Figura 13.** Pantallas propuestas para la aplicación del dispositivo de movilidad urbana. **Fuente:** Imagen de elaboración propia; los logotipos de la Ciudad de México, Metrobus fueron tomados de las páginas oficiales y son de uso ilustrativo. El logotipo de la empresa Industrias Lince e imágenes con autorización previa.

Además, se activará un rastreador GPS (Sistema de Posicionamiento Global, *Global Positioning System*) con la finalidad de proporcionar información de las rutas del dispositivo y su ubicación. Cabe mencionar que actualmente estos dispositivos son comerciales y pueden comprarse en tiendas de electrónica o por internet.

La intención de colocar el rastreador GPS es, por un lado, tener información de la ubicación en tiempo real del dispositivo y por otro, realizar un mapeo de rutas a detalle en donde los actuales sistemas de localización no han tenido acceso por cuestiones satelitales o bien por ser lugares pequeños como callejones, calles cerradas o pequeñas, edificios o túneles. Además, esto aportaría información para extender redes comerciales o de negocios, que pueden

publicarse en redes sociales o en aplicaciones de mapas.

La pantalla de activación también tendrá un ícono que enlazará la aplicación de *Google Maps*, en caso que el usuario busque alguna dirección y quiera saber las rutas o vialidades por donde podrá circular con el dispositivo movilidad urbana.

La app también estará habilitada con un cronómetro, que iniciará su conteo al momento de activar el sistema y permitirá al usuario utilizar el dispositivo por dos horas, en caso de necesitar más tiempo se podrá extender éste hasta por 2 periodos más, de 30 minutos cada uno.

Ahora bien, en caso de necesitar ayuda o auxilio por algún accidente, percance o fallas en el dispositivo, la aplicación también estará vinculada con dos íconos, uno de Ayuda y otro



de Emergencia. El ícono de ayuda será utilizado para reportar alguna avería ya sea mecánica, eléctrica o por *ponchadura* de llanta; de esta forma se enviará la alerta y a la ubicación del dispositivo, a la estación de *Metrobus* más cercana para que personal de mantenimiento pueda atender el problema.

El ícono de emergencia instalado en la aplicación del dispositivo de movilidad, estará enlazado a las aplicaciones de seguridad tanto del Gobierno de la Ciudad de México (CDMX), como del Estado de México; éstas emiten alertas a centrales de policía y a elementos de seguridad pública, para que la respuesta sea pronta ante la situación de urgencia.

Mediante la aplicación también será posible visualizar parámetros propios del dispositivo de movilidad, como la velocidad de viaje, distancia recorrida, tiempo de uso y nivel de carga de batería.

Cada uno de estos parámetros enviará mensajes de alerta, por ejemplo, si esta alcanzado el nivel máximo de velocidad o bien si el nivel de carga de la batería es bajo y necesita conectarse a la corriente eléctrica.

La app del dispositivo de movilidad urbana ha sido propuesta con la premisa, que la mayoría de usuarios tiene acceso a teléfonos celulares y como mínimo tienen cámara y acceso a internet,

sin embargo, para garantizar la accesibilidad a este medio de transporte, también se ha planeado el uso de tarjetas digitales, similares a las utilizadas por el Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC).

Para la opción de tarjeta será necesario registrarse en línea previamente y llenar la solicitud con los datos mencionados; al finalizar el registro será asignada una cuenta de usuario y un archivo digital que deberá imprimirse y entregar en taquillas del transporte o bien en módulos destinados, para la entrega de las tarjetas digitales.

Con tarjeta el usuario podrá acceder al dispositivo de movilidad urbana, presentándola en los lectores colocados en las estaciones habilitadas con los dispositivos, de esta forma será permitido el desbloqueo magnético del motor. Una vez, liberado el dispositivo se iniciará un registro de uso que incluirá: fecha, hora, tiempo de uso, distancia recorrida, velocidad promedio y sitios visitados.

Toda esta información será almacenada en una base de datos y también estará disponible para el usuario en su cuenta de registro. A continuación, se presenta una propuesta de tarjeta (Figura 14) para el dispositivo de movilidad urbana; las imágenes solamente son ilustrativas.



**Figura 14.** Propuesta de tarjeta con la que se podrá tener acceso al dispositivo de movilidad urbana. **Fuente:** Logotipos tomados de las páginas oficiales del Metrobus, Gobierno del Estado de México, Ciudad de México y de la empresa Industrias Lince, con autorización previa. Logotipo de discapacidad con uso de reproducción libre.



Mediante las opciones de Aplicación en teléfonos móviles y la tarjeta digital se pretende realizar el préstamo del dispositivo de movilidad urbana para usuarios de sillas de ruedas.

Cabe señalar que *estas propuestas son líneas de investigación a futuro cercano a desarrollar, no implica que se encuentren disponibles es este momento*. Y para llevarlas a cabo será necesario buscar apoyos académicos, gubernamentales y de iniciativa privada, para que, de manera conjunta, la propuesta de integración del dispositivo de movilidad urbana para usuarios de sillas de ruedas, se pueda llevar a cabo.

Para colocar los dispositivos de movilidad urbana en el STC, será necesario realizar modificaciones mayores debido a que muchas estaciones no tienen accesos adecuados a personas con sillas de ruedas, sin embargo, esto haría que también las personas que circulan por esas estaciones puedan utilizarlos y así también incrementar su movilidad.

#### 4. Conclusiones

Las personas con discapacidad son un sector de la población que requiere de sistemas, dispositivos y objetos de diseño, que satisfagan sus necesidades de movilidad urbana para proporcionar así mayor independencia al realizar sus actividades cotidianas.

Con el propósito de incrementar la movilidad urbana de usuarios de sillas de ruedas que tienen la necesidad de transportarse en la ZMVM, para asistir al trabajo, escuela, actividades deportivas o recreativas, fue propuesto este trabajo el cual, en una primera etapa concluyó con la fabricación de un prototipo físico funcional escala 1:1, que puede acoplarse a una silla de ruedas de uso cotidiano y movilizar al usuario en el entorno urbano, mediante mecanismos mecánicos y eléctricos. El prototipo se diseñó considerando las necesidades obtenidas del cuestionario en

línea y de algunas entrevistas en profundidad realizadas con usuarios.

El costo de fabricación de este primer prototipo fue de \$ 25,000 (veinticinco mil pesos), costo que podría considerarse elevado, sin embargo, es un precio real y coherente, ya que siempre los primeros prototipos resultan caros y cuando son llevados a la fabricación en serie, el costo disminuye debido a la integración de sistemas, procesos de manufactura y compra de materia prima en volúmenes altos a precios más bajos.

En cuanto al mantenimiento del dispositivo, será necesario establecer un programa de mantenimiento preventivo y correctivo, con revisiones semanales para detectar desgaste en los mecanismos y funcionamiento en los sistemas electrónicos y mecánicos. En caso de ser necesario se deberá realizar el cambio de algún elemento, el cual podrá remplazarse de manera rápida ya que la mayoría de las partes del dispositivo pueden obtenerse en el mercado nacional, además de mantener ciertas partes en almacén para agilizar la reparación.

Una de las posibles complicaciones que podrían surgir al momento de utilizar el prototipo es el acoplamiento del dispositivo a la silla de ruedas, debido a que existen diversos modelos y medidas; para ello, se propone diseñar y fabricar accesorios de acoplamiento con ajuste variable.

Estos accesorios se consideran viables ya que, sin importar la variación dimensional y modelos, las sillas de ruedas tienen partes comunes entre ellas, como son: la estructura y el eje principal o flecha y es en estos elementos que podrían integrarse los accesorios de acoplamiento.

Otro aspecto indispensable para que el dispositivo de movilidad urbana pueda ser utilizado por los usuarios, es su evaluación, la cual debe estar centrada en el aspecto ergonómico, funcionalidad, seguridad de uso en el entorno, y resistencia de los materiales.



En cuanto a la propuesta de integrar el dispositivo inicialmente en las estaciones del Metrobus, se deberá realizar convenios con el gobierno de la Ciudad de México y con el Estado de México; presentar el proyecto y buscar las redes de alianza para poder llevarlo a cabo.

Al integrar el dispositivo al flujo vehicular se tiene contemplado que podría haber ciertas afectaciones, entre ellas la posible disminución de velocidad del flujo vehicular, ya que el dispositivo no podrá ir a la misma velocidad que un automóvil y esto podría ocasionar lentitud y tráfico.

Este aspecto de la disminución del flujo vehicular podría evitarse, si el dispositivo pudiera circular en los carriles de las bicicletas, de tal manera que no afectaran la circulación de los automóviles y que los usuarios pudieran viajar con mayor seguridad.

Ahora bien, como limitantes de la propuesta para integrar el dispositivo a las estaciones del BRT se encuentra: 1) la poca disponibilidad del gobierno para desarrollar proyectos tecnológicos y sociales, y 2) la duración de las gestiones administrativas.

Lo anterior debido a los distintos partidos políticos que se encuentren gobernando al País en turno, en cuyo caso los apoyos para proyectos sociales pueden ser retirados, sin previo aviso.

En esta primera etapa del proyecto se cumple el objetivo de fabricar un dispositivo de movilidad urbana para usuarios de sillas de ruedas considerando las características de ZMVM y se hace la propuesta de integrar el dispositivo en estaciones del Metrobus, empleando medios digitales que estarán vinculados para ser utilizados por los usuarios.

En relación al Modelo General del Proceso de Diseño UAM, se puede concluir que siguiendo las etapas fue logrado el diseño y la producción del primer prototipo del dispositivo, considerando que no es un proceso lineal, es una

retroalimentación constante e interactiva entre las diferentes etapas del modelo.

Finalmente, para que el proyecto total pueda evolucionar tecnológicamente, será necesaria la vinculación de cuatro actores importantes: 1) la **Universidad** como parte académica que genera y transmite conocimiento, 2) el sector productivo con **Empresas** mexicanas interesadas en el desarrollo de nuevos productos y avances tecnológicos, 3) el sector **Gobierno** para dirigir, regular y construir la infraestructura del entorno urbano, y 4) la **Sociedad** que genera recursos y que debe estar organizada para mejorar conjuntamente la calidad de vida de las personas.

## 5. Agradecimientos

- Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, por el apoyo de beca del Posgrado en Diseño y Desarrollo de Productos.

-Proyecto Divisional Diseño de Interfaces Inteligentes para la Simulación de Comportamientos de Organismos Vivos o Animados: sección de Interfaces de usuario inteligentes.

[http://kali.azc.uam.mx/clc/00\\_principal/menu\\_inicio.html](http://kali.azc.uam.mx/clc/00_principal/menu_inicio.html)

-Industrias Lince por ROE-MEX S.A. de C.V.

-Nuestras Realidades A.C.

-A todas las personas que participaron en la encuesta en línea y en las entrevistas. Por motivos de ética de confidencialidad no aparecen sus nombres.

## 6. Reconocimiento de autoría

*Israel Garduño Bonilla*: Conceptualización, Investigación, Metodología, Escritura-Borrador original. *Emilio Martínez de Velasco y Arellano*: Metodología, Supervisión, Análisis e Investigación.



Ana Lilia Laureano-Cruces: Metodología, Supervisión, Revisión, Análisis de la Investigación, Edición.

### Referencias

- [1] INEGI, "Presentación de resultados censo 2020 Estados Unidos Mexicanos," México, 2020. Accessed: Jul. 31, 2021. [Online]. Available: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/Censo2020\\_Principales\\_resultados\\_ejecutiva\\_EUM.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ccpv/2020/doc/Censo2020_Principales_resultados_ejecutiva_EUM.pdf)
- [2] IMCO, "Índice de movilidad urbana: barrios mejor conectados para ciudades más incluyentes," México, Jan. 2019. Accessed: Jul. 31, 2020. [Online]. Available: <https://imco.org.mx/indices/indice-de-movilidad-urbana/capitulos>
- [3] M. L. Gutiérrez *et al.*, *Contra un Diseño Dependiente: un modelo para la autodeterminación nacional*, Primera Edición. México: Universidad Autónoma Metropolitana-Azc. División de Ciencias y Artes para el Diseño, 1992. <http://hdl.handle.net/11191/402>
- [4] SEDATU, CONAPO, and INEGI, *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*, Primera Edición. México, 2018. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/sedatu>
- [5] OECD, "OECD Territorial Reviews: Valle de México, México," OECD, Oct. 2015. doi: 10.1787/9789264245174-en.
- [6] Gobierno del Distrito Federal, "Ley de Movilidad del Distrito Federal," Oct. 2016. Accessed: Jul. 31, 2021. [Online]. Available: [http://www.paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2016/LEY\\_MOVILIDAD\\_DISTRITO\\_FEDERAL\\_07\\_10\\_2016.pdf](http://www.paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2016/LEY_MOVILIDAD_DISTRITO_FEDERAL_07_10_2016.pdf)
- [7] INEGI, "La discapacidad en México, datos al 2014. Versión 2017," México, 2017. Accessed: Sep. 10, 2021. [Online]. Available: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvineg](https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvineg)
- [8] SEDESOL, "Diagnóstico sobre la situación de las personas con discapacidad en México," 2016. Accessed: Jul. 31, 2021. [Online]. Available: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126572/Diagnostico\\_sobre\\_la\\_Situacion\\_de\\_las\\_Personas\\_Con\\_Discapacidad\\_Mayo\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126572/Diagnostico_sobre_la_Situacion_de_las_Personas_Con_Discapacidad_Mayo_2016.pdf)
- [9] F. García, *La investigación tecnológica*, PRIMERA. México: Limusa Noriega Editores, 2005. <http://bdigital.ula.ve/storage/pdf/recitium/v1n2/art04.pdf>
- [10] D. Naranjo, "The Impact of Bus Rapid Transit System on Land Prices in Mexico City," 2013. Accessed: Jul. 31, 2021. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/resrep18409.5>
- [11] Gobierno de la Ciudad de México, *Manual de Normas Técnicas de Accesibilidad*. México, 2016. [http://data.indepedi.cdmx.gob.mx/manual\\_accesibilidad.html](http://data.indepedi.cdmx.gob.mx/manual_accesibilidad.html)
- [12] J. Brázdil, "The estimation of property damage caused to the company ZLKL in consequence of damage of the ELBEE vehicle prototype," 2012. Accessed: Jul. 08, 2021. [Online]. Available: [https://theses.cz/id/lrggkc/?lang=en#panel\\_latex](https://theses.cz/id/lrggkc/?lang=en#panel_latex)
- [13] Access Exchange International, "Bringing the Gap," 2017. Accessed: Jul. 31, 2021. [Online]. Available: <https://www.globalride-sf.org/TransportingChildren/GuideToSchool.pdf>
- [14] N. G. Herguido, J. L. P. Cunill, A. B. Moreno, M. S. Macias, S. Morales-Conde, and P. P. García-Luna, "Paciente con paraplejía y obesidad mórbida; nuevo reto en la cirugía bariátrica," *Nutricion Hospitalaria*, vol. 29, no. 6, pp. 1447-1449, 2014. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.29.6.7400>



[15] M. D. R. Rivera-Barragán, "Alimentación en estudiantes con discapacidad," *Horizonte Sanitario*, vol. 19, no. 3, pp. 311–323, Sep. 2020. <https://doi.org/10.19136/hs.a19n3.3653>.

[16] M. Ortiz, "Preparación y caracterización de materiales compuestos para electrodos de baterías de litio," 2nda Jornada de Investigación Cerámica, 2016. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/2469>

[17] D. Maneiah, D. Mishra, K. P. Rao, and K. B. Raju, "Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al 6061-T6 alloy butt welded joints," in *Materials Today: Proceedings*, Jan. 2020, vol. 27, pp. 904–908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.215>.

[18] K. Chanyathunyaroj, S. Phetchcrai, G. Laungsopapun, and A. Rengsomboon, "Fatigue characteristics of 6061 aluminum alloy

subject to 3.5% NaCl environment," *International Journal of Fatigue*, vol. 133, Apr. 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105420>.

[19] E. L. Rooy, "Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys," in *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, vol. Vol 2, ASM International, 1990.

<https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02.a0001057>.

[20] P. E. Hemeren, M. Johannesson, M. Lebram, and F. Eriksson, "Detecting Cyclists at Night: visibility effects of reflector placement and different lighting conditions," 2017. [Online]. Available:

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.1>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Polylactic acid/multi walled carbon nanotubes (PLA/MWCNT) nanocomposite for 3D printing of medical devices

## *Nanocomposito ácido poliláctico-nanotubos de carbono multi pared (PLA/MWCNT) para la impresión 3D de dispositivos médicos*

Manuel Alejandro Cardona Salcedo<sup>1</sup> , Mercedes Teresita Oropeza Guzmán<sup>1</sup> , Grecia Isis Moreno Grijalva<sup>1</sup> ,  
Arturo Zizumbo López<sup>2</sup> , Juan Antonio Paz González<sup>3</sup> , Yadira Gochi Ponce<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial s/n col. Mesa de Otay, 22500, Tijuana, Baja California, México

<sup>2</sup>Centro de Graduados e Investigación en Química, Instituto Tecnológico de Tijuana, Blvd. Industrial s/n col. Mesa de Otay, 22500, Tijuana, Baja California, México

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California. Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México

**Corresponding author:** Dra. Yadira Gochi Ponce, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial s/n col. Mesa de Otay, 22500, Tijuana, Baja California, México. E-mail: [yadira.gochi@tectijuana.edu.mx](mailto:yadira.gochi@tectijuana.edu.mx). ORCID: 0000-0002-1590-2432.

**Received:** November 22 2021

**Accepted:** November 25 2021

**Published:** December 8 2021

**Abstract.** - In recent years, the composite nanomaterials area has had a great development impact in health sciences. Biomaterials depict as one of the most promising since they are compatible with additive manufacturing (AM) techniques. It is also possible to use them to mold specific medical parts. Composite nanomaterials have shown good biocompatibility and low toxicity to have benefits equal to or greater than metals (i.e., Co-Cr alloy). The purpose of this study is to develop a nanocomposite biomaterial (PLA/MWCNT<sub>f</sub>) from Polylactic Acid (PLA) and functionalized Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT<sub>f</sub>) to evidence its potential application in 3D printing of orthopedic fixation devices. PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite was prepared by solution blending technique, incorporating a proportion of 0.5 wt% of MWCNT<sub>f</sub> to the PLA matrix. TGA analysis of the PLA/MWCNT<sub>f</sub> was used to determine the thermal stability, a slight increase was found compared to the PLA. FTIR spectroscopy confirmed the presence of carboxylic acid groups in the MWCNT<sub>f</sub> which improves good incorporation of the nanotubes in the PLA matrix. Additionally, Raman spectroscopy, SEM, and AFM micrographs were used to verify MWCNT<sub>f</sub> reached the PLA surface homogeneously. Additive manufacturing preparation was done by extrusion molding of PLA/MWCNT<sub>f</sub> as well as its 3D printing.

**Keywords:** Polylactic acid (PLA); Multi walled carbon nanotubes (MWCNT); 3D printing; Biomaterials; Nanocomposites.

**Resumen.** - En los últimos años el área de los nanomateriales compuestos ha tenido un gran impacto en el desarrollo de las ciencias de la salud. Los biomateriales se describen como uno de los más prometedores, ya que son compatibles con las técnicas de manufactura aditiva (AM). También es posible utilizarlos para moldear piezas médicas específicas. Los nanomateriales compuestos han demostrado una buena biocompatibilidad y baja toxicidad para tener beneficios iguales o superiores a los de los metales (p. ej. aleación de Co-Cr). El propósito de este estudio es desarrollar un biomaterial nanocomposito (PLA/MWCNT<sub>f</sub>) a partir de ácido poliláctico (PLA) y nanotubos de carbono multi pared funcionalizados (MWCNT<sub>f</sub>) para evidenciar su potencial aplicación en la impresión 3D de dispositivos de fijación ortopédica. El nanocomposito de PLA/MWCNT<sub>f</sub> se preparó mediante la técnica de mezclado en solución, incorporando una proporción de 0,5% en peso de MWCNT<sub>f</sub> a la matriz de PLA. Se utilizó el análisis TGA de PLA/MWCNT<sub>f</sub> para determinar la estabilidad térmica, se encontró un ligero aumento en comparación con el PLA. La espectroscopía FTIR confirmó la presencia de grupos carboxilos en los MWCNT<sub>f</sub> lo que mejora una buena incorporación de los nanotubos en la matriz PLA. Además, se utilizó espectroscopía Raman y SEM para verificar que MWCNT<sub>f</sub> alcanzara la superficie de PLA de manera homogénea. La preparación de la manufactura aditiva se realizó mediante moldeo por extrusión de PLA/MWCNT<sub>f</sub> así como su impresión 3D.

**Palabras clave:** Ácido poliláctico (PLA); Nanotubos de carbono multi pared (MWCNT); Impresión 3D; Biomateriales; Nanocompositos.



## 1. Introduction

Medical devices can be manufactured from a wide variety of materials using different techniques. Additive Manufacturing is a processes that allows us a personalized development of different medical devices, satisfying the particular needs of each patient [1], [2]. According to NOM-240-SSA1-2012, medical devices are manufactured for the purpose of diagnosing, monitoring or preventing disease in humans or auxiliary in the treatment of them and disability, as well as to be used in the replacement, correction, restoration or modification of the anatomy or physiological processes. Medical devices include products in the following categories: medical equipment, prostheses, orthosis, functional aids, dental supplies, surgical materials, among others [3]. Nanocomposite biomaterials are in constant research and development as they offer better properties than the materials commercially used in this area. Different metal alloys are used for the production of orthopedic prostheses (total hip replacement, total knee replacement) and also orthopedic fixation devices, specifically those used in osteosynthesis procedures (screws, plates, nails, rods). One of the most widely used metal alloy is Cobalt-Chromium, however, various authors and patients have reported adverse effects caused by this alloy [4].

According to literature, serum cobalt and chromium concentrations are increased in patients with prostheses made with this mentioned material, this condition is known as metallosis. Campbell et al. [5] shows that some of the effects caused by high Co concentrations are periprosthetic soft tissue reactions, cardiomyopathies and hypothyroidism. In addition, Green et al. [6] explains the emergence of neurological abnormalities caused by this metallosis, among which are: concentration problems, short term memory deficit, disorientation in place, neurocognitive deficits, even dementia, among others. Similarly, other

registered symptoms are loss of weight and appetite, depression, low energy and metallic taste.

According to what has been explained, neurodegenerative problems, cardiopathies and polyneuropathies are some of the most dangerous adverse effects that have been evidenced due to Cobalt-Chromium prostheses metallosis [6–12]. Due to all these mentioned consequences, in 2020 cobalt was listed as a CMR (carcinogenic, mutagenic and toxic for reproduction). This event generates the need to develop new alternative materials to Co-Cr. Biodegradable polymers have been of great importance in biomedical applications, mainly due to their high acceptance by the human body (biocompatibility) and their low toxicity, being Polylactic Acid (PLA) one of those with best properties.

PLA being a biopolymer, it does not come from oil derivatives, instead at an industrial level it is produced from corn starch. In addition, PLA is biodegradable and biocompatible polymer. PLA is also bioabsorbable, due to this fact, it is used for the manufacture of bioabsorbable surgical sutures and orthopedic screws, which do not need to be removed as they are absorbed by the human body. Also, PLA is the most widely used material in various additive manufacturing (AM) processes such as 3D printing by FDM (Fused Deposition Modeling) and SLA (Stereolithography). PLA matrix nanocomposites biomaterials have had a strong development in recent years, mainly those reinforced with nanofillers such as carbon nanostructures (i.e., multi walled and single walled carbon nanotubes, graphene, graphene oxide, reduced graphene oxide, carbon dots, among others) [13-29].

Nanocomposites are manufactured with the purpose of obtaining better properties (i.e., mechanical, electrical, thermal, biological) than



those of their components alone. All these improvements give them a wide spectrum of applications, mainly in the manufacture of cell scaffolds, prostheses, biosensors, artificial tissues and drug delivery [31].

Chen, et al. [14] reported that adding graphene oxide (GO) to a copolymer of PLA-PU (Polylactic Acid-Polyurethane) notably improves the mechanical, thermal and biological properties of the composite compared to the PLA-PU alone. Also, they used the composite for 3D printing of a cell scaffold and evaluated its cell viability. Additionally, Liu et al. [15] manufactured a surgical suture from a composite of PLA reinforced with Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT), achieving an increase in mechanical resistance. The nanocomposite they developed registered also an increase of up to 50% in the bioabsorption time as well as a 100% in the strength valid time.

Azizi et al. [23] developed a nanocomposite from a copolymer of Polypropylene/Polylactic acid (PP/PLA) with Multiwalled Carbon Nanotubes, they improved the mechanical strength of the copolymer as well as its biodegradation time in soil. They also suggest that this nanocomposite is a good candidate for use in food packaging. On the other hand, Spinelli et al. [24] studied the electromagnetic properties of a nanocomposite of Polylactic acid (PLA) with Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) and Graphene Nanoplatelets (GNP). They found an interest behavior, the electromagnetic efficiency of the nanocomposite depended on the aspect ratio of the nanofillers. As mentioned, adding carbon nanostructures to polymers such as PLA can improve various properties that can be used in different applications. In order to avoid the use of Co-Cr alloy for the manufacture of prostheses. The purpose of this study is to developed a PLA nanocomposite biomaterial reinforced with MWCNT to be used in 3D FDM printing of

orthopedic fixation devices used in osteosynthesis procedures.

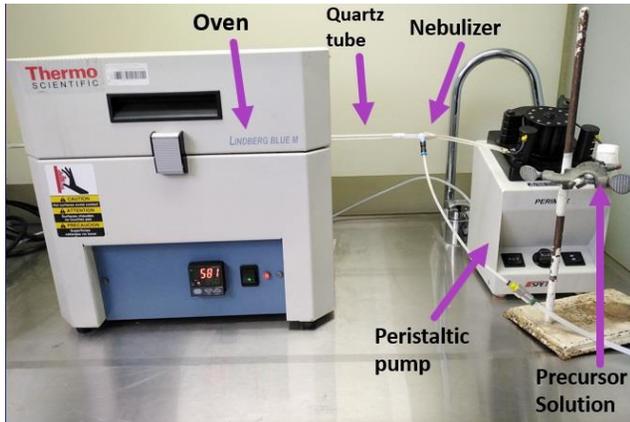
## 2. Methodology

### 2.1 Materials

In this research, transparent PLA filament from Nature Works model Ingeo Biopolymer 3D850 was used as the polymeric matrix of the nanocomposite. The Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) were synthesized by spray pyrolysis technique to be used as reinforcement of the polymeric matrix [32]. Toluene ( $C_7H_8$ ), ferrocene ( $C_{10}H_{10}Fe$ ), chloroform ( $CHCl_3$ ), sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ), nitric acid ( $HNO_3$ ) and hydrochloric acid ( $HCl$ ) used were from Sigma Aldrich.

### 2.2 MWCNT synthesis

A Toluene/Ferrocene solution was prepared at 0.1 M, subsequently the solution was introduced under an inert atmosphere (Ar) to the synthesis system by a peristaltic pump SPETEC model PERIMAX with a flow of 10 ml/hr. The synthesis system consists of a Thermo Scientific Lindberg Blue M oven with a quartz concentric tube which must be at 850 °C. In addition, an Agilent nebulizer was used to introduce the Toluene/Ferrocene solution and a source of Argon (Ar) gas to maintain an inert atmosphere within the system. Once the precursor solution entered the oven together with Ar for 30 minutes, the synthesis was concluded. Finally, the MWCNT were extracted manually from the quartz tube with a metallic rod. Figure 1 shows the carbon nanotubes synthesis system used.



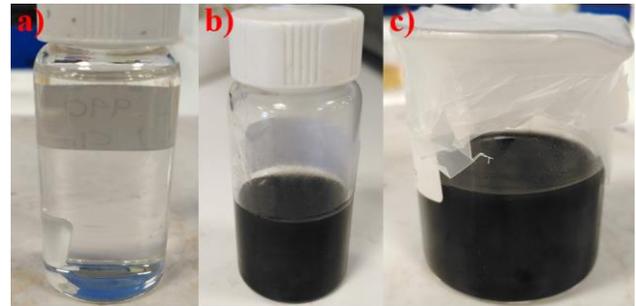
**Figure 1.** MWCNT synthesis system.

### 2.3 MWCNT modification

In order to obtain a good interaction between the PLA polymer matrix and the MWCNT, the nanotubes were functionalized by incorporating COOH functional groups through an acid treatment [33]. 100 mg of MWCNT were placed in a solution of  $H_2SO_4:HNO_3$  in a ratio of 3:1 vol. for 5 hours in an ultrasonic bath, then 10 ml of HCl 1M was added and they were left to sonicate for 30 minutes. Subsequently they were diluted in deionized water and dried with a vacuum pump. The MWCNT functionalized with carboxylic acids (COOH) were called MWCNT<sub>f</sub>.

### 2.4 PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite development

The nanocomposite biomaterial developed was called PLA/MWCNT<sub>f</sub>, was synthesized using solution blending method [34]. The PLA was dispersed in chloroform under magnetic stirring. Similarly, the MWCNT<sub>f</sub> were dispersed in chloroform in an ultrasonic bath for 1 hour. Subsequently, both dispersions were mixed. The dispersions of PLA and MWCNT<sub>f</sub> before and after mixing are shown in Figure 2. Once the dispersion of PLA and MWCNT<sub>f</sub> was homogenized, it was dried at 50 °C for 24 hrs.

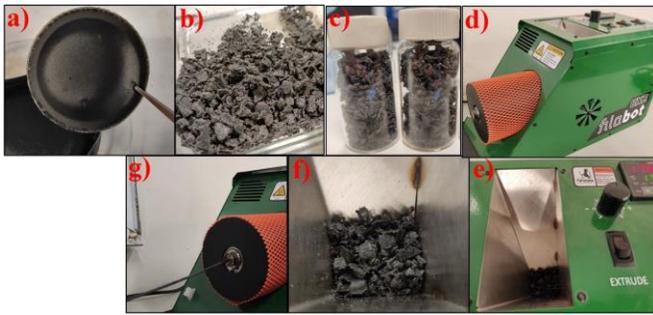


**Figure 2.** a) PLA dispersed in chloroform, b) MWCNT<sub>f</sub> dispersion c) PLA/MWCNT<sub>f</sub> dispersion.

Different characterizations were carried out to the elaborated materials. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Raman Spectroscopy were obtained with a Shimadzu IR Spirit and Thermo Scientific DXR Smart Raman 780 nm, respectively. For Thermogravimetric Analysis (TGA) a TA Instruments model SDT 2960 Simultaneous DSC-TGA was used. Scanning Electron Microscopy (SEM) micrographs were obtained with a TESCAN model VEGA3 microscope and FESEM JEOL. Atomic Force Microscopy (AFM) analysis was performed on a Nanosurf Easy Scan equipment.

### 2.4 PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite molding

To prepare the nanocomposite material for 3D Printing, the synthesized nanocomposite film (PLA/MWCNT<sub>f</sub>) was subjected to a molding process which consisted of several steps. The film was crushed using a blender, subsequently the crushed nanocomposite was entered into a Filabot EX2 extrusion equipment. The extrusion machine was set at 170 °C to produce the 1.75 mm diameter nanocomposite filament, which is the most standard dimension used in 3D printers. Figure 3 shows the extrusion molding process of the PLA/MWCNT<sub>f</sub>.

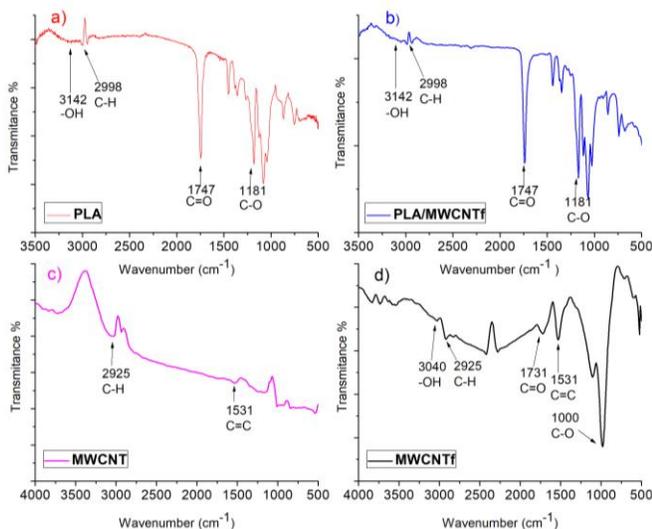


**Figure 3.** PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite extrusion molding process.

### 3. Results

#### 3.1 FTIR spectroscopy

Figure 4 shows the spectra of the PLA polymer matrix and the PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite. The stretching band of 1747 cm<sup>-1</sup> and a broad band between 3050-3142 cm<sup>-1</sup> correspond to the carboxyl groups (COOH) proper to the structure of PLA, while at 1181 cm<sup>-1</sup> corresponds to CO bonds of the steric chain matrix. Furthermore, in the same figure the FTIR spectra of the MWCNT and MWCNT<sub>f</sub> are presented, the wave number value of 1531 cm<sup>-1</sup> corresponds to the C=C bonds of the structure of carbon nanotubes while the value of 1731 cm<sup>-1</sup> correspond to the carbonyl CO groups from COOH added to the MWCNT<sub>f</sub>.



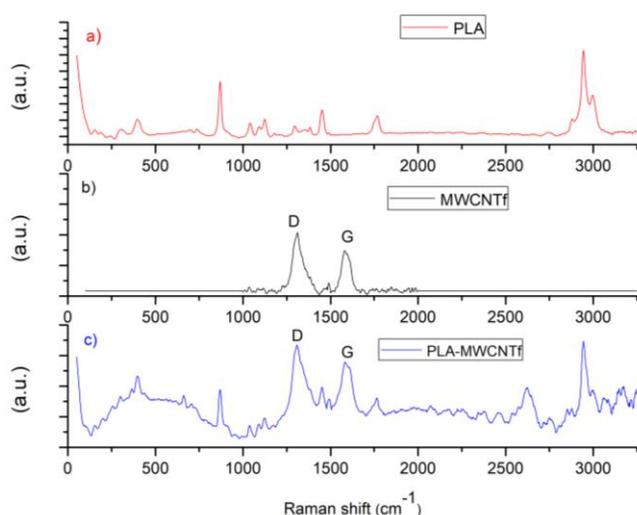
**Figure 4.** FTIR spectrums of: a) PLA, b) PLA/MWCNT<sub>f</sub>, c) MWCNT and d) MWCNT<sub>f</sub>.

#### 3.2 Raman spectroscopy

Raman spectroscopy is a very useful characterization technique since it is non-destructive with the sample and valuable information can be extracted from this spectroscopic technique. Multi Walled Carbon Nanotubes have a characteristic spectrum made up of two bands, D and G. The relationship between the intensity of both bands (D/G) give information about the number of defects that the MWCNT have, the higher this ratio, the greater the number of defects the nanotubes will have [35]. The D band is located at an approximate wave number value of 1300 cm<sup>-1</sup>, while the G band is at an approximate value of 1600 cm<sup>-1</sup>.

In Figure 5, D band presents greater intensity than the G, this is due to the defects that were generated in the nanotubes by the oxidative functionalization. Similarly, the spectrum of Poly-lactic Acid has several characteristic peaks, some of them are at 850 cm<sup>-1</sup>, 1400 cm<sup>-1</sup>, 1750 cm<sup>-1</sup>, 2900 cm<sup>-1</sup>. The Raman spectrum of a composite material clearly results in the sum of the spectra of the raw materials, showing a good incorporation of nanometric reinforcement into the polymeric matrix.

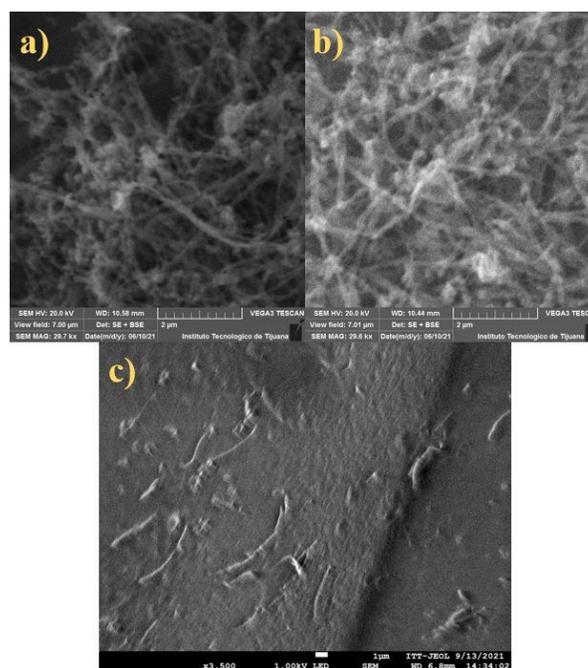
Most of all the characteristic peaks of each material is shown in the nanocomposite spectrum, including a new peak approximately at 2650 cm<sup>-1</sup> suggesting binding forces between PLA and MWCNT<sub>f</sub> (see Figure 5).



**Figure 5.** Raman spectra of: a) PLA, b) MWCNT<sub>f</sub>, c) PLA/MWCNT<sub>f</sub>.

### 3.4 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Figure 6 shows MWCNT, MWCNT<sub>f</sub> and PLA/MWCNT<sub>f</sub>. Functionalized Multi Walled Carbon Nanotubes (b) show less agglomeration than the pristine Nanotubes (a), this behavior is consequence of the acid modification (functionalization). Using ImageJ, an open-source software, the calculated diameter of the MWCNT<sub>f</sub> was 28-60 nm, with an average diameter of 48 nm. The way in which MWCNT<sub>f</sub> physically interact with the polymeric matrix of Polylactic Acid (PLA) is shown in Figure 6 (c), it can be seen how the nanotubes are embedded within the polymer.



**Figure 6.** SEM micrograph of a) MWCNT, b) MWCNT<sub>f</sub>, c) PLA/MWCNT<sub>f</sub>.

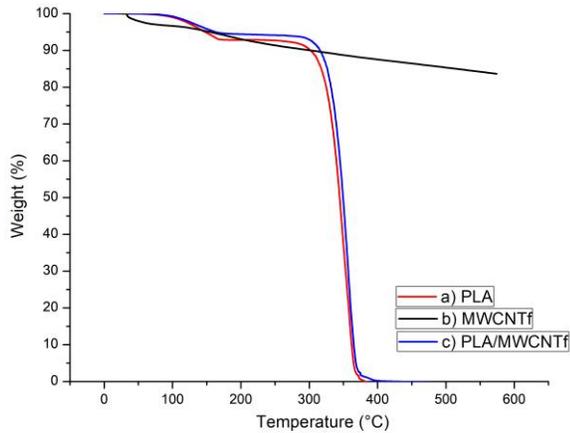
### 3.3 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Functionalized Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT<sub>f</sub>) were analyzed in an inert atmosphere (Nitrogen) with a temperature of 0-800 °C and a heating ramp of 10 °C/min, while Polylactic Acid and PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite were analyzed in air atmosphere at 0-600 °C and a heating ramp of 10 °C/min. Figure 7 shows MWCNT<sub>f</sub> thermogram, which has a decrease in their thermal stability due to the oxidative treatment and carboxyl functionalization.

Simultaneously, Figure 7 also shows the thermogram of PLA and PLA/MWCNT<sub>f</sub>. The nanocomposite registered an increase in the thermal stability at different temperature intervals compared to the polymer (PLA), this enhancement is due to the incorporation of the MWCNT<sub>f</sub> to the polymeric matrix which allow a delay in the weight loss of the material. Additionally, Table 1 shows the temperature value at which the materials lose a specific



weight loss percentage. This thermal stability improvement extends the application area of the nanocomposite, however in this study the material is proposed to be used at physiological temperatures (37 °C).



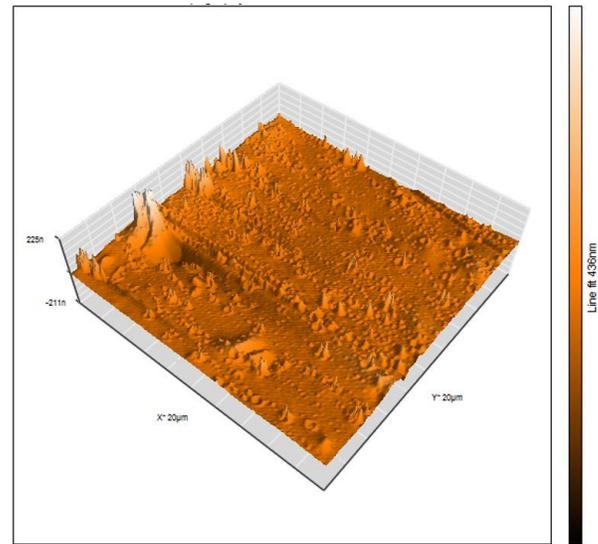
**Figure 7.** TGA thermograms: a) PLA, b) MWCNT<sub>f</sub>, c) PLA/MWCNT<sub>f</sub>.

**Table 1.** TGA weight loss values.

Sample	T <sub>10%</sub> weight loss (°C)	T <sub>25%</sub> weight loss (°C)	T <sub>50%</sub> weight loss (°C)	T <sub>75%</sub> weight loss (°C)
PLA	302	329.7	344.3	355.4
PLA/MWCN T <sub>f</sub>	315. 5	336.0 4	349.3 4	358.8 4

### 3.5 Atomic Force Microscopy (AFM)

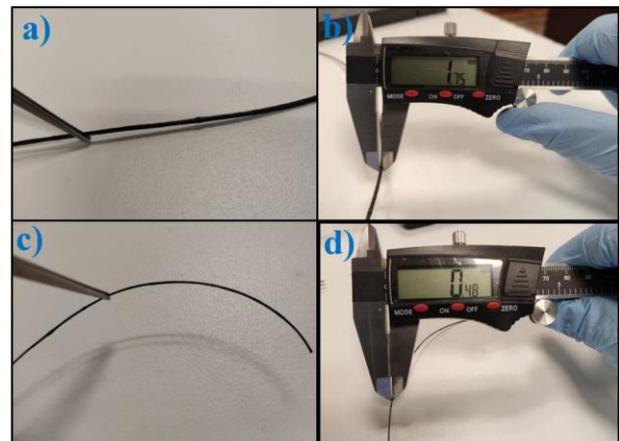
Figure 8 presents the recorded AFM micrograph of the PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite surface, it shows the surface generated by the incorporation between the polymeric matrix (PLA) and the nano reinforcement (MWCNT<sub>f</sub>). Using ImageJ, the calculated average diameter of the circular bumps present on the surface was 57.16 nm, which coincide within the range of the diameter of the carbon nanotubes. It is proposed that these bumps are produced by the incorporation of the nano-reinforcement within the polymeric matrix.



**Figure 8.** AFM micrograph of PLA/MWCNT<sub>f</sub>.

### 3.6 3D Printing Extrusion

The dimensions of the extruded PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite filament were measured with a vernier caliper, obtaining a result of 1.75 mm in diameter. Subsequently, the filament was introduced into an Anet ET4 3D printer with a 0.4 mm extruder nozzle at a temperature of 220 °C, thin filaments whose dimension was 0.48 mm were obtained. Figure 9 shows the extruded filament (a) with its diameter measure (b), additionally the 3D printed filament (c) and its diameter measure (d).



**Figure 9.** PLA/MWCNT<sub>f</sub> nanocomposite extruded filament (a-b) and 3D printed filament (c-d).



#### 4. Conclusions

Solution blending technique was successful to developed a PLA/MWCNT<sub>f</sub> 0.5 wt% nanocomposite for additive manufacturing (3D printing). In addition, through different characterizations some properties of the synthesized biomaterial were studied and determined complementing what has already been reported in the literature. The nanocomposite was successfully extruded and 3D printed, additionally it presented an increase in its thermal stability compared with the polymeric matrix (PLA). An interaction between the nanofillers (Multi Walled Carbon Nanotubes) and the polymer (PLA) was determined by the Raman spectroscopy SEM and AFM micrographs. Some of the techniques and procedures that will soon be used for PLA/MWCNT<sub>f</sub> are 3D printing of the orthopedic device and biocompatibility tests (hemolytic and cell viability).

#### 5. Acknowledgements

To TecNM Project Number: 10716.21-P, Tecnológico Nacional de México/IT de Tijuana and CONACYT.

#### 6. Authorship and contribution

*Manuel Alejandro Cardona Salcedo:* Project conceptualization, manuscript redaction-edition, methodology, research, analysis and validation. *Mercedes Teresita Oropeza Guzmán:* Revision, redaction, project supervision-administration, methodology and analysis. *Grecia Isis Moreno Grijalva:* Methodology and analysis. *Zizumbo López Arturo:* Data analysis, validation. *Juan Antonio Paz González:* Methodology and analysis. *Gochi Ponce Yadira:* Redaction, project supervision, analysis.

#### References

- [1] L. M. Ricles, J. C. Coburn, M. Di Prima, and S. S. Oh, "Regulating 3D-printed medical products," *Sci. Transl. Med.*, vol. 10, no. 461, pp. 1-7, 2018. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aan6521>.
- [2] M. Di Prima, J. Coburn, D. Hwang, J. Kelly, A. Khairuzzaman, and L. Ricles, "Additively manufactured medical products - the FDA perspective," *3D Print. Med.*, vol. 2, no. 1, pp. 4-9, 2016. <https://doi.org/10.1186/s41205-016-0005-9>.
- [3] Norma Oficial Mexicana, NOM-240-SSA1-2011, Instalación y operación de la tecnovigilancia. 2012, p. 13. <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4600/salud/salud.htm>
- [4] J. J. Devlin, A. C. Pomerleau, J. Brent, B. W. Morgan, S. Deitchman, and M. Schwartz, "Clinical Features, Testing, and Management of Patients with Suspected Prosthetic Hip-Associated Cobalt Toxicity: A Systematic Review of Cases," *J. Med. Toxicol.*, vol. 9, no. 4, pp. 405-415, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13181-013-0320-0>
- [5] J. R. Campbell and M. P. Estey, "Metal release from hip prostheses: Cobalt and chromium toxicity and the role of the clinical laboratory," *Clin. Chem. Lab. Med.*, vol. 51, no. 1, pp. 213-220, 2013. <https://doi.org/10.1515/cclm-2012-0492>.
- [6] B. Green, E. Griffiths, and S. Almond, "Neuropsychiatric symptoms following metal-on-metal implant failure with cobalt and chromium toxicity," *BMC Psychiatry*, vol. 17, no. 1, pp. 1-5, 2017.



- <https://doi.org/10.1186/s12888-016-1174-1>.
- [7] L. Leyssens, B. Vinck, C. Van Der Straeten, F. Wuyts, and L. Maes, "Cobalt toxicity in humans-A review of the potential sources and systemic health effects," *Toxicology*, vol. 387, pp. 43-56, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2017.05.015>.
- [8] A. C. Cheung et al., "Systemic cobalt toxicity from total hip arthroplasties," *Bone Jt. J.*, vol. 98B, no. 1, pp. 6-13, 2016. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.98B1.36374>
- [9] A. Vaicelyte, C. Janssen, M. Le Borgne, and B. Grosgeat, "Cobalt-Chromium Dental Alloys: Metal Exposures, Toxicological Risks, CMR Classification, and EU Regulatory Framework," *Crystals*, vol. 10, no. 12, p. 1151, 2020. <https://doi.org/10.3390/cryst10121151>.
- [10] T. Ikeda, K. Takahashi, T. Kabata, D. Sakagoshi, K. Tomita, and M. Yamada, "Polyneuropathy caused by cobalt-chromium metallosis after total hip replacement," *Muscle and Nerve*, vol. 42, no. 1, pp. 140-143, 2010. <https://doi.org/10.1002/mus.21638>.
- [11] A. W. Schaffer, A. Pilger, C. Engelhardt, K. Zweymueller, and H. W. Ruediger, "Increased blood cobalt and chromium after total hip replacement," *J. Toxicol. - Clin. Toxicol.*, vol. 37, no. 7, pp. 839-844, 1999. <https://doi.org/10.1081/CLT-100102463>.
- [12] W. Apel, D. Stark, A. Stark, S. O'Hagan, and J. Ling, "Cobalt-chromium toxic retinopathy case study," *Doc. Ophthalmol.*, vol. 126, no. 1, pp. 69-78, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10633-012-9356-8>.
- [13] B. Scharf et al., "Molecular analysis of chromium and cobalt-related toxicity," *Sci. Rep.*, vol. 4, no. 1, p. 5729, 2014. <https://doi.org/10.1038/srep05729>.
- [14] Q. Chen, J. D. Mangadlao, J. Wallat, A. De Leon, J. K. Pokorski, and R. C. Advincula, "3D printing biocompatible polyurethane/poly(lactic acid)/graphene oxide nanocomposites: Anisotropic properties," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 4, pp. 4015-4023, 2017. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11793>.
- [15] S. Liu et al., "Degradation behavior in vitro of carbon nanotubes (CNTs)/poly (lactic acid) (PLA) composite suture," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 6, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11061015>.
- [16] M. Gong, Q. Zhao, L. Dai, Y. Li, and T. Jiang, "Fabrication of polylactic acid/hydroxyapatite/graphene oxide composite and their thermal stability, hydrophobic and mechanical properties," *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 5, no. 2, pp. 160-168, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2017.04.001>.
- [17] P. O. Andrade, M. A. V. M. Grinet, M. M. Costa, A. M. E. Santo, F. R. Marciano, and A. O. Lobo, "Poly (Lactic Acid) Fine Fibers Containing a Low Content of Superhydrophilic Multi-Walled Carbon Nanotube Graphene Oxide Hybrid as Scaffolds for Biological Applications," *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 303, no. 11, pp. 1-11, 2018. <https://doi.org/10.1002/mame.201800317>.
- [18] F. Alam, V. R. Shukla, K. M. Varadarajan, and S. Kumar, "Microarchitected 3D printed polylactic acid (PLA) nanocomposite scaffolds for biomedical applications," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 103, p. 103576, 2020.



- <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103576>
- [19] C. H. Tsou et al., "Antibacterial property and cytotoxicity of a poly (lactic acid)/nanosilver-doped multiwall carbon nanotube nanocomposite," *Polymers (Basel)*, vol. 9, no. 3, pp. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.3390/polym9030100>.
- [20] A. F. Ahmad et al., "Biodegradable poly (lactic acid)/poly (ethylene glycol) reinforced multi-walled carbon nanotube nanocomposite fabrication, characterization, properties, and applications," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 2, pp. 1-22, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12020427>.
- [21] G. Spinelli et al., "Effects of filament extrusion, 3D printing and hot-pressing on electrical and tensile properties of poly (Lactic) acid composites filled with carbon nanotubes and graphene," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 1, pp. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano10010035>.
- [22] L. Yang et al., "Effects of carbon nanotube on the thermal, mechanical, and electrical properties of PLA/CNT printed parts in the FDM process," *Synth. Met.*, vol. 253, no. December 2018, pp. 122-130, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.05.008>.
- [23] S. Azizi, M. Azizi, and M. Sabetzadeh, "The role of multiwalled carbon nanotubes in the mechanical, thermal, rheological, and electrical properties of pp/pla/mwcnts nanocomposites," *J. Compos. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.3390/jcs3030064>.
- [24] G. Spinelli et al., "Morphological, rheological and electromagnetic properties of nanocarbon/poly(lactic) acid for 3D printing: Solution blending vs. melt mixing," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 11, pp. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11112256>.
- [25] M. Kaseem, K. Hamad, F. Deri, and Y. G. Ko, "A review on recent researches on polylactic acid/carbon nanotube composites," *Polym. Bull.*, vol. 74, no. 7, pp. 2921-2937, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00289-016-1861-6>.
- [26] Y. Shen et al., "Chemical and thermal reduction of graphene oxide and its electrically conductive polylactic acid nanocomposites," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 72, no. 12, pp. 1430-1435, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.05.018>.
- [27] C. Hu et al., "Comparative assessment of the strain-sensing behaviors of polylactic acid nanocomposites: reduced graphene oxide or carbon nanotubes," *J. Mater. Chem. C*, vol. 5, no. 9, pp. 2318-2328, 2017. <https://doi.org/10.1039/C6TC05261D>.
- [28] C. Liu, J. Shen, K. W. K. Yeung, and S. C. Tjong, "Development and Antibacterial Performance of Novel Polylactic Acid-Graphene Oxide-Silver Nanoparticle Hybrid Nanocomposite Mats Prepared by Electrospinning," *ACS Biomater. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 471-486, 2017. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.6b00766>.
- [29] A. M. Pinto, J. Cabral, D. A. P. Tanaka, A. M. Mendes, and F. D. Magalhães, "Effect of incorporation of graphene oxide and graphene nanoplatelets on mechanical and gas permeability properties of poly (lactic acid) films," *Polym. Int.*, vol. 62, no. 1, pp. 33-40, 2013. <https://doi.org/10.1002/pi.4290>.



- [30] B. W. Chieng, N. A. Ibrahim, W. M. Z. W. Yunus, M. Z. Hussein, Y. Y. Then, and Y. Y. Loo, "Effects of graphene nanoplatelets and reduced graphene oxide on poly (lactic acid) and plasticized poly (lactic acid): A comparative study," *Polymers (Basel)*, vol. 6, no. 8, pp. 2232-2246, 2014. <https://doi.org/10.3390/polym6082232>.
- [31] K. Tappa et al., "3D printing custom bioactive and absorbable surgical screws, pins, and bone plates for localized drug delivery," *J. Funct. Biomater.*, vol. 10, no. 2, 2019. <https://doi.org/10.3390/jfb10020017>.
- [32] A. Aguilar-Elguézabal, W. Antúnez, G. Alonso, F. P. Delgado, F. Espinosa, and M. Miki-Yoshida, "Study of carbon nanotubes synthesis by spray pyrolysis and model of growth," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 15, no. 9, pp. 1329-1335, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.10.011>.
- [33] L. S. Tejada Aguayo, "Síntesis de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) funcionalizados con el ácido 2,3-dihidroxi benzoico selectivo al Fe<sup>3+</sup> como tratamiento potencial de talasemia", tesis de maestría, CGIQ., Instituto Tecnológico de Tijuana, Tijuana, México, 2018.
- [34] A. V. Rane, K. Kanny, V. K. Abitha, and S. Thomas, "Methods for Synthesis of Nanoparticles and Fabrication of Nanocomposites," in *Synthesis of Inorganic Nanomaterials*, Elsevier Ltd., 2018, pp. 121-139. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101975-7.00005-1>.
- [35] J. H. Lehman, M. Terrones, E. Mansfield, K. E. Hurst, and V. Meunier, "Evaluating the characteristics of multiwall carbon nanotubes," *Carbon N. Y.*, vol. 49, no. 8, pp. 2581-2602, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.03.028>.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Software de fotoelasticidad RGB en placas de materiales birrefringentes al esfuerzo

## *RGB photoelasticity software on plates of stress birefringent materials*

David Trejo Carrillo , Rubén Castañeda Balderas , Alberto Díaz Díaz 

Metalurgia e Integridad estructural, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Av. Miguel de Cervantes Saavedra 120, Complejo Industrial Chihuahua, 31136 Chihuahua, Chihuahua, México

**Autor de correspondencia:** David Trejo Carrillo, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Av. Miguel de Cervantes Saavedra 120, Complejo Industrial Chihuahua, 31136 Chihuahua, Chihuahua, México. E-mail: [david.trejo@cimav.edu.mx](mailto:david.trejo@cimav.edu.mx). ORCID: 0000-0001-8189-682X.

**Recibido:** 31 de Agosto del 2021      **Aceptado:** 01 de Diciembre del 2021      **Publicado:** 30 de Diciembre del 2021

**Resumen.-** La fotoelasticidad digital utiliza el fenómeno de la birrefringencia para el análisis y descripción de la distribución de esfuerzos a través de imágenes digitales y del procesamiento digital de las mismas. En este trabajo se presenta el desarrollo y diseño de un código, abierto y gratuito, en MATLAB que adopta la metodología de la fotoelasticidad RGB para determinar la distribución de la diferencia de esfuerzos principales en una probeta plana de un material fotoelástico, sometida a cargas mecánicas en un estado de esfuerzos planos. Esto mediante el procesamiento de una imagen digital a color de un espécimen de material birrefringente al esfuerzo, colocado dentro de un polariscopio circular en su configuración de campo oscuro. Se presenta la generación de imágenes artificiales representativas del fenómeno con el fin de tener datos de entrada para el desarrollo del algoritmo y una forma de validarlo. Se muestran también los pasos necesarios para la metodología de la fotoelasticidad RGB que incluyen la preparación de una base de datos o tabla de búsqueda y el análisis de la imagen fotoelástica. Se compara, además, el resultado del cálculo de la diferencia de esfuerzos principales con resultados de elemento finito, en lo cual se obtuvo un buen grado de confiabilidad en las imágenes utilizadas.

**Palabras clave:** Fotoelasticidad digital; Distribución de esfuerzos; Software; MATLAB.

**Abstract.** - Digital photoelasticity uses the phenomenon of birefringence for the analysis and description of the stress distribution through digital images and their digital processing. This work presents the development and design of a free, open-source code in MATLAB that adopts the RGB photoelasticity methodology to determine the distribution of the principal stress difference in a flat specimen of a photoelastic material, subjected to mechanical loads in a state of flat stresses. This by processing a digital color image of a specimen of stress birefringent material, placed inside a circular polariscope in its dark field configuration. The generation of artificial images representative of the phenomenon is presented in order to have input data for the development of the algorithm and a way to validate it. The steps required for the RGB photoelasticity methodology are also shown, including preparing a database or lookup table and analyzing the photoelastic image. In addition, the result of the calculation of the difference in principal efforts is compared with the results of the finite element, in which a good degree of reliability was obtained in the images used.

**Keywords:** Digital photoelasticity; Stress distribution; Software; MATLAB.

## 1. Introducción

La fotoelasticidad es una técnica que utiliza el fenómeno de la birrefringencia o doble refracción para el análisis y descripción de la distribución de esfuerzos [1]. Dicho fenómeno se debe a propiedades ópticamente anisótropas, presentes en ciertos materiales cristalinos; sin embargo, algunos materiales no cristalinos pueden exhibir birrefringencia cuando son sometidos a un esfuerzo [2], por ejemplo polímeros como el policarbonato, el poliuretano y el polimetilmetacrilato [3].

La técnica de la fotoelasticidad permite entonces, observar los esfuerzos a los que está sometido el material a través de patrones de interferencia producidos por el retardo causado en una onda electromagnética al pasar por el material birrefringente al esfuerzo [4, 5]. Para visualizar y analizar el fenómeno se requiere de un instrumento óptico conocido como polariscopio; se muestra un ejemplo en la Figura 1.



**Figura 1.** Ejemplo de un material birrefringente al esfuerzo visto a través del arreglo óptico del polariscopio.

Es pertinente señalar que la fotoelasticidad pertenece a las técnicas denominadas de campo completo [6]. Esto quiere decir que permite visualizar y determinar la distribución de esfuerzos a lo largo de toda la probeta sometida a carga [7]. Lo anterior representa una valiosa información en cuanto a la caracterización de materiales mediante pruebas mecánicas debido a que lo más habitual es obtener información del esfuerzo y la deformación en función del desplazamiento de la máquina que realiza la

prueba o con la ayuda de sensores que ofrecen información puntual [8]. Por lo que el desarrollo e implementación de métodos fotoelásticos, como el desarrollo de un algoritmo de tipo libre y gratuito que implemente la fotoelasticidad digital, permitirá obtener información experimental invaluable para el avance de la ciencia de materiales. Sin embargo cabe destacar que la tendencia en cuanto al análisis de esfuerzos es utilizar dos o más métodos que proporcionen información cada vez más precisa [1, 9, 10].

La fotoelasticidad ha tenido un papel considerable dentro de la historia de los métodos experimentales de análisis de esfuerzos. Se ha usado mucho antes del empleo de herramientas computacionales y tiene gran utilidad en analizar componentes de geometría compleja o con distribuciones de esfuerzos no uniformes debido, sobre todo, a que con un equipo relativamente sencillo es posible llegar a buenas aproximaciones [11]. Mediante el procesamiento digital de imágenes, se han hecho grandes avances en cuanto a la adquisición y procesamiento de los datos de manera automática. A esto se le conoce como fotoelasticidad digital que implica el uso de la técnica de la fotoelasticidad a través de imágenes digitales y el procesamiento digital de las mismas [12, 13, 14].

Así pues, el desarrollo de técnicas de fotoelasticidad digital ha girado en torno a la búsqueda de una mayor automatización mediante el uso de las herramientas computacionales [14]. Para esto, han sido propuestas numerosas técnicas para la obtención de información fotoelástica precisa. Algunos de estos métodos han sido: adelgazamiento de franjas, desplazamiento de fase, desplazamiento de carga, tres longitudes de onda, análisis del transporte de franja, análisis espectral, escaneo de franjas, uso de la transformada de Fourier, y la fotoelasticidad RGB o también llamada de tres franjas [15, 16, 17].

En este trabajo se presenta una herramienta de software, abierta y gratuita, para describir la distribución de la diferencia de esfuerzos principales en probetas planas de un material fotoelástico sometido a cargas mecánicas; esto implementando la técnica de la fotoelasticidad digital RGB, mediante imágenes digitales, representativas del fenómeno, generadas artificialmente con la ayuda de los datos arrojados por una simulación de elemento finito de probetas de geometría sencilla.

**2. Metodología**

**2.1. Fotoelasticidad RGB**

De manera general, cualquier método que utilice el fenómeno de la fotoelasticidad pretende obtener información a partir del patrón formado y de la intensidad de la luz de las imágenes obtenidas a través del arreglo óptico. De forma más particular, el método de la fotoelasticidad RGB consiste en determinar el retardo relativo y con él, la distribución de la diferencia de esfuerzos principales, a través de una imagen, obtenida por una cámara digital, del espécimen de un material birrefringente al esfuerzo, en un polariscopio circular [17]. Dicho retardo está en función del campo de esfuerzo inducido, por lo que tendrá características distintas en cada punto de la pieza [1, 18]; lo anterior por medio de la relación:

$$\delta = \frac{2\pi h}{\lambda} C(\sigma_{p1} - \sigma_{p2}) \tag{1}$$

donde  $h$  es el espesor del modelo,  $\lambda$  la longitud de onda del rayo incidente,  $(\sigma_{p1} - \sigma_{p2})$  la diferencia de esfuerzos principales y  $C$  es el coeficiente de esfuerzo óptico relacionado con el material. Es usual reescribir la ecuación 1 en términos del llamado orden de franja ( $N$ ):

$$N = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{h}{\lambda} C(\sigma_{p1} - \sigma_{p2}) \tag{2}$$

y también de la forma conocida como ley de esfuerzo óptico:

$$(\sigma_{p1} - \sigma_{p2}) = \frac{N\lambda}{hC} \tag{3}$$

La fotoelasticidad RGB consiste básicamente en dos pasos: calibración y demodulación. En la calibración se crea una base de datos o tabla de búsqueda. La manera más común de generar la tabla de búsqueda [19, 20, 21], es obtener los valores de los canales  $R, G, B$  a lo largo de una línea en la sección transversal (ver Figura 2) de la imagen digital de una probeta plana, de material birrefringente, sometida a flexión pura [17, 14]. Esto debido a que el esfuerzo varía de forma lineal a lo largo de la sección mencionada [22]. En este proyecto se propuso construir la tabla de búsqueda de manera teórica tomando como referencia el trabajo de Swain et al. [23].



**Figura 2.** Ejemplo de una probeta a flexión. La línea punteada marca la sección de interés para generar la tabla de búsqueda.

**2.2. Tabla de búsqueda**

Por medio de un código en MATLAB, se elaboró la tabla de búsqueda según el siguiente procedimiento:

- Seleccionar el material del espécimen, así como determinar su altura y su espesor. Se eligió un modelo de 5 mm de espesor, 5 cm de altura y como material el polimetilmetacrilato que presenta un coeficiente fotoelástico ( $C$ ) de  $1.08 \times 10^{-10} \text{ m}^2/N$  [7].
- Determinar el orden de franja máximo ( $N_{max}$ ) y la resolución deseada. En este caso, resolución tiene que ver con la relación de franja por pixel. Se determinó el orden de franja

máximo como 3 y una resolución de 0.01 franja/pixel.

- Calcular el valor del esfuerzo máximo en el punto más lejano del eje neutro de la probeta con la relación:

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}\lambda_G}{hC} \tag{4}$$

Es pertinente aclarar que se tomó como referencia la longitud de onda verde ( $\lambda_G = 545 \text{ nm}$  [17]).

- Obtener el valor del esfuerzo en cualquier punto a lo largo de la línea seleccionada, a partir de

$$\sigma_i = \sigma_{max} \left( \frac{d_i}{d_{max}} \right) \tag{5}$$

donde  $d$  es la distancia del eje neutro a la orilla del espécimen; en este caso sería  $d = altura/2$ .

- Con el resultado anterior, calcular en cada punto el valor del orden de franja para cada longitud de onda:

$$N_R = \frac{hC\sigma_i}{\lambda_R} \tag{6}$$

$$N_G = \frac{hC\sigma_i}{\lambda_G} \tag{7}$$

$$N_B = \frac{hC\sigma_i}{\lambda_B} \tag{8}$$

donde  $N_R, N_G, N_B$ , son los respectivos valores de orden de franja para cada una de las longitudes de onda utilizadas ( $\lambda_R = 610 \text{ nm}$  y  $\lambda_B = 435 \text{ nm}$  [24]).

- Finalmente, se calcula el valor del nivel de intensidad para cada uno de los canales R, G, B:

$$I_k(i) = I_{k_{max}} \text{sen}^2(N_{k_i}\pi) \tag{9}$$

que es la expresión clásica de la intensidad [1] de un polariscopio circular para una fuente de luz

monocromática, donde  $I_k$  es la intensidad para cada una de las longitudes de onda ( $R, G, B$ ),  $I_{k_{max}}$  la intensidad máxima de la fuente de luz y  $k$  los canales  $R, G, B$ .

Con esta información se construye la tabla de búsqueda. En la Figura 3 se presenta la curva RGB, o el valor de la intensidad para cada color visto en un espacio tridimensional; esto presenta de manera intuitiva la línea a la que debe encontrarse la distancia más corta al relacionar la tabla de búsqueda con alguna imagen a analizar.

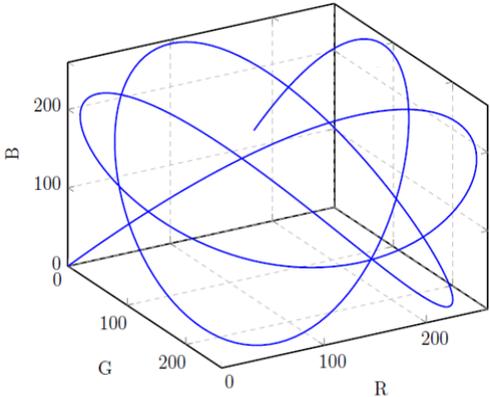


Figura 3. Curva RGB.

2.2.1. Adaptación de la tabla de búsqueda

Al elaborar la tabla de búsqueda, lo ideal es que las intensidades de los colores resultantes sean lo más parecidas a las de la imagen a analizar para realizar una mejor correlación. Sin embargo, debido a ciertas variaciones que pudieran resultar [25] es recomendable hacer una adaptación de color [14].

Se han propuesto algunas metodologías para subsanar dicha situación. Una de ellas es normalizar la imagen del espécimen a través de filtros digitales [26, 27], y otra manera es adaptar los datos de la tabla de búsqueda a las intensidades de la imagen que es lo que se adopta en este trabajo basado en Swain et al. [19] donde se sugiere un esquema de adaptación de color mediante una interpolación cuadrática de tres

puntos. De esta manera se obtiene una nueva tabla de búsqueda.

### 2.3. Búsqueda del retardo

Es conveniente recordar que una imagen digital puede considerarse como una matriz de valores de pixeles; las imágenes RGB o a color se representan como un arreglo numérico de  $m \times n \times 3$  [28]. Es decir, que hay tres matrices distintas para los valores de intensidad de los canales rojo, verde y azul, respectivamente. El rango de los valores numéricos para cada pixel varía dependiendo del tipo de dato utilizado que puede ser de 0 a 1 (*single* o *double*) o de 0 a 255 (*uint8*) [29]. Dicho esto, el segundo paso de la fotoelasticidad RGB, llamado demodulación, consiste en obtener información de la imagen fotoelástica; para esto se requiere determinar el retardo en cualquier punto del área a analizar a través de sus niveles de intensidad para cada canal R, G, B mediante una comparación con los valores previamente guardados en la tabla de búsqueda. Hay que mencionar que por lo general la tabla se construye en términos del orden de franja (ecuación (2)), y este se obtiene al minimizar el valor de una función para cada pixel de la imagen fotoelástica [19]:

$$e_i = \sqrt{(R - R_i)^2 + (G - G_i)^2 + (B - B_i)^2 + K^2(N_{j-1} - N_j)^2} \quad (10)$$

donde  $R, G, B$  son los niveles de intensidad de la imagen analizada;  $R_i, G_i, B_i$  corresponden a los valores almacenados en la tabla de búsqueda; la expresión (10) toma también en cuenta la continuidad del orden de franja pues  $K$  es un parámetro de regularización para tomar en cuenta la variación continua de la distribución de esfuerzos y en este caso se utilizó un valor de  $K = 75$ ;  $N_{j-1}$  es el valor del orden de franja del pixel vecino tomando en cuenta si el escaneo se realiza vertical u horizontalmente y  $N_j$ , cualquier valor posible en la tabla de búsqueda.

### 2.4. Elección de semilla

Con la consideración de tomar en cuenta los valores de orden de franja previamente asignados, resulta importante la elección del primer valor que será el punto de partida para el escaneo de toda el área de interés de la imagen. Dicho valor se conoce como semilla. Evidentemente, al ser el valor que será referencia para asignar a los pixeles vecinos (que a su vez serán referencia para otros pixeles y así sucesivamente), no posee un referente para su elección. De manera que hay que tener en mente dicha asignación, por lo que se han propuesto varios esquemas de escaneo [30, 31, 32].

En este trabajo, las imágenes se escanearon de la siguiente manera: ya que las imágenes presentan un arreglo matricial, se realiza una asignación del orden de franja sin tomar en cuenta su continuidad para elegir un pixel como valor semilla. Para su elección se selecciona el pixel que más cercano haya estado a la curva de la tabla de calibración. Con dicho valor asignado se escanea la columna a la que pertenece respetando la continuidad y finalmente se barre el resto de la imagen hacia la derecha e izquierda.

### 2.5. Generación de imágenes fotoelásticas artificiales

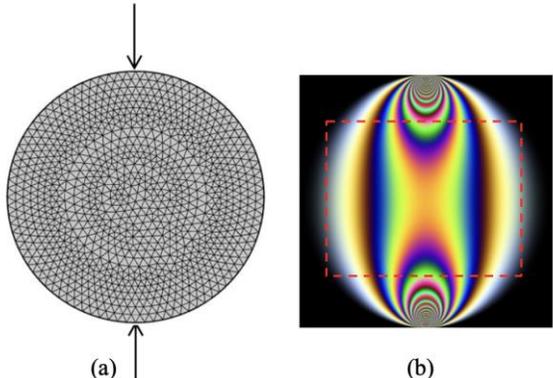
Para la programación de la técnica y la validación de resultados es necesario contar con imágenes representativas del fenómeno de la fotoelasticidad que sirvan como datos de entrada. Se optó por generar imágenes artificiales, ya que permiten conocer la distribución de esfuerzos dentro de la geometría del material; esto permite validar el software al conocer con antelación dicha distribución, y ofrecen la posibilidad de probar con distintas geometrías y cargas.

A través de una simulación de elemento finito con el software COMSOL Multiphysics, se obtuvo la distribución de la diferencia de los esfuerzos principales en algunos modelos de

geometría simple. En particular: un disco en compresión uniaxial, y una probeta cuadrada con un orificio central. A partir de los datos arrojados, se calculó la diferencia de esfuerzos principales en cada nodo del modelo. Con dicha información se obtuvo la intensidad de la luz transmitida (ecuación (9)) por el polariscopio circular en su configuración de campo oscuro, tal como la captaría una cámara digital que lo separa en los canales  $R, G, B$ , asumiendo que la fuente de luz blanca está formada por tres longitudes de onda de la misma intensidad, correspondientes a los colores rojo, verde y azul (similar a la de una fuente de luz fluorescente) con las longitudes de onda mencionadas en el apartado 2.2, y que no hay dispersión de la birrefringencia, por lo que se asume que el material en cuestión presenta un coeficiente fotoelástico constante.

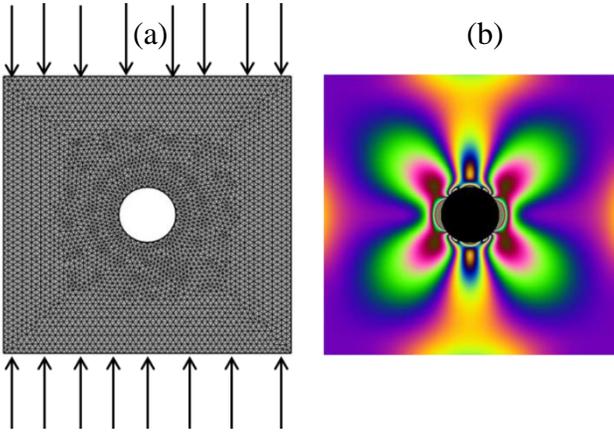
Los datos se importaron hacia MATLAB para, mediante una interpolación, obtener el valor de los píxeles para los canales  $R, G, B$ , y así obtener la imagen fotoelástica artificial. En la figura 4 se muestra una representación de la geometría simulada (4a) y la imagen fotoelástica artificial generada con los datos de la probeta en forma de

disco de polimetilmetacrilato de 5 cm de radio y 0.5 cm de espesor, sometida a una carga uniaxial de 200 N (4b).



**Figura 4.** Representación del modelo seleccionado para la simulación (a). Imagen fotoelástica artificial de un disco en compresión (b) (se muestra enmarcada en un recuadro cierta área de interés seleccionada para el escaneo).

siguiendo este mismo proceso se calculó otra imagen de geometría sencilla considerando el mismo material y espesor: probeta cuadrada de 5 cm de lado con un orificio en el centro de 5 mm de radio (figura 5a) sometido a compresión con una carga de 250 N (véase la figura 5b).



**Figura 5.** (a) Representación del modelo seleccionado para la simulación del cuadro a compresión, (b) Imagen fotoelástica artificial de una probeta cuadrada en compresión de 5 cm de lado sometido a una carga de 250 N.

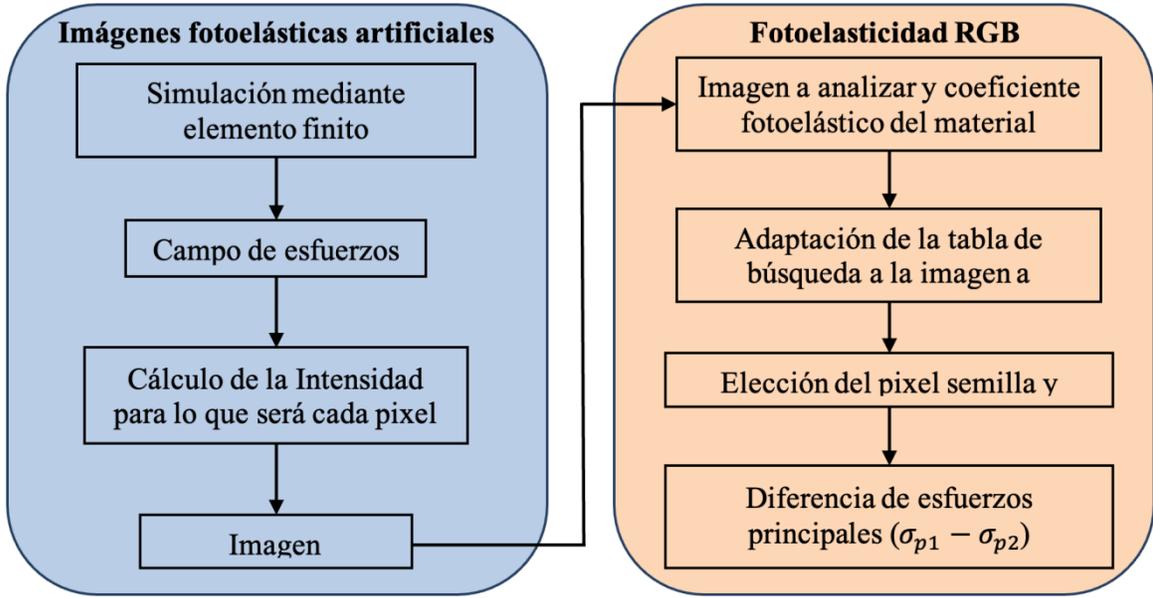


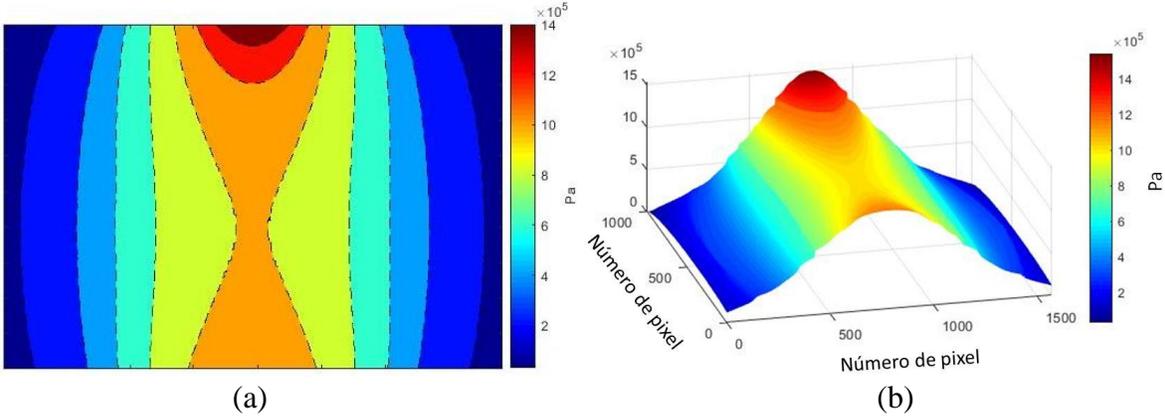
Figura 6. Esquema de la metodología utilizada.

En la figura 6 se puede observar un esquema de la metodología empleada para este trabajo.

**3. Resultados**

Las imágenes fotoelásticas, generadas artificialmente, sirven de dato para el código desarrollado en MATLAB. Este permite seleccionar un área de interés dentro de la imagen a analizar, y obtener información mediante el uso de la ecuación (2). Con la información del número de franja asociado a cada pixel de la imagen considerada se calculó la diferencia de esfuerzos principales mediante la relación (1).

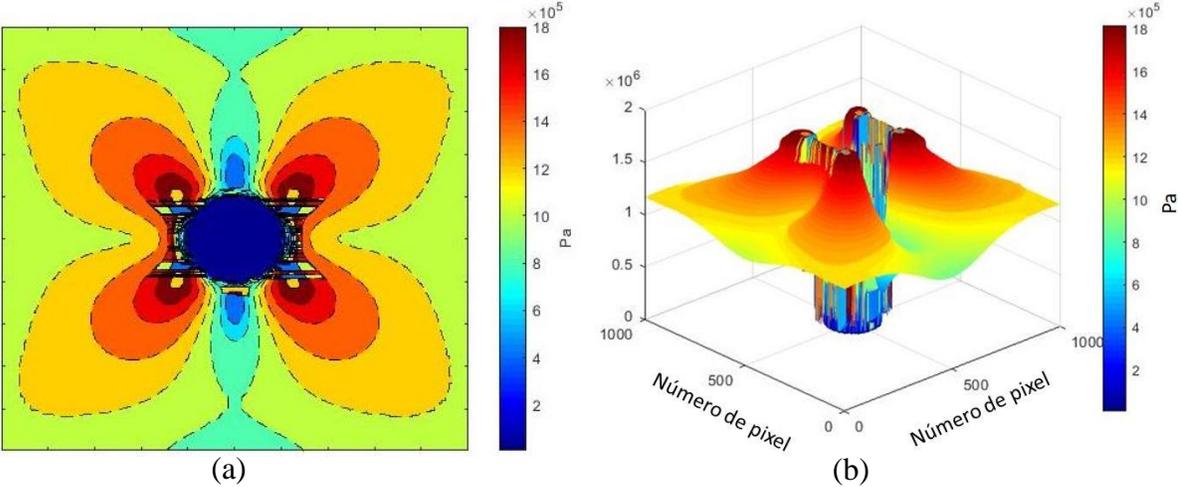
En la figura 5b (imagen fotoelástica artificial de un disco de polimetilmetacrilato a compresión) se muestra enmarcada en un recuadro cierta área de interés seleccionada para el análisis. Al comparar la intensidad de los canales R, G, B de cada pixel del área seleccionada con los de la tabla de búsqueda según lo expuesto en el apartado 2.3 y minimizando el valor de la función (10) se asigna a cada pixel evaluado un valor de orden de franja. Con esto se obtiene también la diferencia de esfuerzos principales en cada punto de la imagen analizada. Se presenta la distribución de esfuerzos calculada, en pascales, en dicha sección de la imagen fotoelástica artificial del disco a compresión en la figura 7.



**Figura 7.** Diferencia de esfuerzos principales en la sección del disco analizada (en Pa). Presentada en un gráfico de curva de nivel (a), y de superficie tridimensional (b).

El gráfico señala los valores calculados en curvas de nivel (figura 7a) y en la figura 8b, la misma distribución en un gráfico de superficie donde la

altura está en relación con los valores obtenidos. Se puede observar que dicha distribución varía de forma continua a lo largo de la imagen analizada.



**Figura 8.** Diferencia de esfuerzos principales en la probeta del cuadro a compresión (en Pa). Se presenta en un gráfico de curva de nivel (a), y de superficie tridimensional (b).

Se hizo una comparación de los resultados obtenidos con los de la simulación en COMSOL Multiphysics de la siguiente manera: después de tener asignado un valor de la diferencia de esfuerzos principales en cada pixel de la imagen analizada, se interpolaron los datos para compararlos con puntos específicos de la simulación por elemento finito. Se obtuvo, para

cada punto comparado, un error relativo según la ecuación (11), donde el esfuerzo promedio es precisamente un promedio de la diferencia de esfuerzos principales en el modelo simulado. Para el análisis de la imagen mencionada, el 94% de los puntos comparados presentan un error relativo menor al 5%; además, un 5% de puntos tienen un error relativo entre 5 y 10%; en

promedio, el error relativo en toda la imagen es de un 2 %.

$$er(\%) = \frac{\text{dato escaneo} - \text{dato simulación}}{\text{esfuerzo promedio}}(100) \quad (11)$$

También se presenta en la figura 8 el resultado de la asignación de la diferencia de esfuerzos principales en la imagen artificial de la probeta de polimetilmetacrilato cuadrada con un orificio central. Se muestra la distribución en curvas de nivel (figura 8a), mientras que la figura 8b esquematiza la misma distribución en una gráfica de superficie tridimensional. Se puede observar que dicha distribución varía de forma continua a lo largo de la imagen analizada tal como se pretendía; también se presentan ciertas discontinuidades donde existen concentraciones de esfuerzo, así como en una zona sin material en el centro del espécimen. Para los resultados de esta imagen, el promedio del error relativo fue 3.5 %, el porcentaje de los puntos comparados con un error relativo menor a 5% fue 97% y también un 2.4% de puntos tienen un error mayor a 20 %.

#### 4. Discusión y conclusiones

Se desarrolló un algoritmo en MATLAB que calcula la distribución de la diferencia de esfuerzos principales a través de una imagen fotoelástica, mediante el método de la fotoelasticidad RGB. El programa puede presentar los resultados en gráficos estilo mapa de colores, así como la facilidad de evaluar algún punto de interés. También, se generaron satisfactoriamente imágenes artificiales que muestran el fenómeno de la fotoelasticidad con la ayuda de los datos arrojados por la simulación de elemento finito de probetas de geometría sencilla. Además, fue posible crear una tabla de búsqueda de manera teórica y adaptarla a las imágenes requeridas según requiere la técnica implementada. La adaptación de la tabla de búsqueda arrojó buenos resultados en la asignación del retardo relativo. Finalmente, la comparación de la distribución de la diferencia

de esfuerzos principales arrojada por el algoritmo al escanear las imágenes, con los datos de la simulación de elemento finito dio un buen grado de confiabilidad en las imágenes utilizadas. Es importante señalar que el código al que se hace referencia se encuentra disponible en un trabajo más extenso [33].

Hay que mencionar rango de la tabla de búsqueda es importante ya que es el rango en el que podemos comparar y asignar un número de franja a cada pixel y, por lo tanto, un valor de la diferencia de esfuerzos principales. El método utilizado hace una comparación de las intensidades en los canales R, G, y B entre la tabla y la imagen; en otras palabras, lo que hace es encontrar el color más parecido aún si algún valor de orden de franja de la imagen fotoelástica excede la tabla de búsqueda utilizada. A esto se le atribuyen ciertos valores del error relativo calculado en las imágenes.

Sin embargo, es importante mencionar que el orden de franja máximo detectable en el espécimen está íntimamente relacionado con la fuente de luz empleada. De manera general, en los métodos fotoelásticos, se han utilizado lámparas incandescentes que presentan un espectro de emisión continuo; esto genera limitaciones en cuanto al orden de franja máximo detectable debido a que la señal RGB decrece rápidamente mientras incrementa el orden de franja. Para este tipo de fuente de luz, se utiliza, por lo general, un orden de franja máximo igual a tres. Con otro tipo de fuente, como luz formada por solo con tres longitudes de onda o mediante filtros para los canales RGB se puede aumentar el orden de franja máximo. Una opción más sencilla es una lámpara fluorescente de espectro discreto donde el orden máximo de franja puede llegar hasta doce [19, 24]. Se puede elaborar la tabla de búsqueda con un mayor orden de franja y así trabajar con ese tipo de fuentes de luz. Aun así, se menciona que hay mejores resultados para órdenes de franja bajos [26, 34] a menos que se utilice una tabla experimental.

Otra situación de interés se da en zonas de alta concentración de esfuerzos y en las de baja diferencia de esfuerzos principales. Por lo general donde la concentración de esfuerzos es elevada, la asignación del orden de franja dependerá en gran medida de la resolución y el tamaño de pixel del equipo de adquisición ya que se deben analizar una gran cantidad de franjas y se requiere también una gran cantidad de datos que ofrecen los pixeles de la imagen. De igual manera, se presenta otra situación en las zonas donde la diferencia de esfuerzos principales es baja. Esto parece deberse a que, en la región de órdenes de franja bajos de la tabla de búsqueda, las intensidades de los tres canales R, G, y B generan tonos similares que pueden influir en los resultados.

Por todo lo anterior, implementar una tabla de calibración experimental puede ser de gran utilidad para extender las capacidades del software así como dotarlo de métodos de escaneo y reducción de ruido para geometrías más complejas [31, 32].

Finalmente, es necesaria la validación el software mediante imágenes experimentales y así facilitar la ejecución de nuevas investigaciones. Es importante también trabajar en la separación de la diferencia de esfuerzos principales, para acceder al tensor de esfuerzos y a través de la ecuación de comportamiento obtener información de las deformaciones en la probeta. También es posible ampliar la técnica, y utilizarla no solo en probetas de materiales fotoelásticos sino en otro tipo de materiales mediante algún recubrimiento que sí tenga dicha propiedad.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen de manera especial al Centro de Investigación en Materiales Avanzados y al laboratorio de Prototipos e integridad mecánica del Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural. Así como al programa de maestría en ciencia de materiales y

al programa de becas de posgrado del CONACYT.

## 6. Reconocimiento de autoría

*Rubén Castañeda Balderas*: Conceptualización; Metodología; Supervisión. *Alberto Díaz Díaz*: Supervisión; Recursos; Revisión. *David Trejo Carrillo*: Conceptualización; Software; Borrador original; Escritura.

## Referencias

- [1] W. N. Sharpe, Springer handbook of experimental solid mechanics, New York: Springer Science & Business Media, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7>
- [2] D. Post, «Photoelasticity» Experimental Mechanics, vol. 19, n° 5, pp. 176-192, 1979. <https://doi.org/10.1007/BF02324263>
- [3] J. F. Doyle, Modern experimental stress analysis: completing the solution of partially specified problems, John Wiley & Sons, 2004. <https://doi.org/10.1002/0470861584>
- [4] E. A. Garrido, Estudio de esfuerzos mecánicos en materiales oftálmicos mediante fotoelasticidad. Tesis de maestría, UNiversidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco. 2017. <http://hdl.handle.net/11191/5752>.
- [5] K. Ramesh y V. Ramakrishnan, «Digital photoelasticity of glass: A comprehensive review» Optics and Lasers in Engineering, vol. 87, pp. 59-74, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.03.017>
- [6] M. Dundovic, K. Morkovic y M. V. Z. Franulovic, «Digital light processing in photoelastic models production for material behavior modeling» Procedia Structural integrity, vol. 31, pp. 111-115, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.03.018>

- [7] J. Urango, G. Carmen, J. Briñez y A. Restrepo, «Validación del uso de la fotoelasticidad como herramienta para los cursos de mecánica de sólidos» EIA, vol. 14, n° 28, pp. 117 - 131, 2017. <https://doi.org/10.24050/reia.v14i28.1145>
- [8] A. Rey, Modelado del comportamiento mecánico no lineal de un policarbonato en el estado vítreo. Tesis de doctorado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., Chihuahua, Chih., 2019.
- [9] Z. Ren, H. Xie y Y. Ju, «Determination of stress and strain fields in porous structures by photoelasticity and digital image correlation techniques» Polymer Testing, n° 102, p. 107315, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107315>
- [10] P. C. Sung, W. C. Wang y C. H. L. G. T. Hwang, «A low-level stress measurement method by integrating white light photoelasticity and spectrometry» Optics & Laser Technology, vol. 98, pp. 33-45, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.07.022>
- [11] E. Patterson, «Automated photoelastic analysis» Strain, vol. 1, n° 24, pp. 15-20, 1988. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.1988.tb00650.x>
- [12] C. A. Magallanes, «Computational methods of phase shifting to stress measurement with photoelasticity using plane polariscope» Optik, vol. 130, pp. 213-226, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.11.037>
- [13] J. C. R. A. Briñez y F. López, «Estudios de fotoelasticidad: desarrollos y aplicaciones,» Revista politécnica, n° 16, pp. 27-36, 2013. <https://doi.org/10.33571/rpolitec>
- [14] K. Ramesh y S. Sasikumar, «Digital photoelasticity: Recent developments and diverse applications» Optics and Lasers in Engineering, vol. 135, pp. 106-186, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106186>
- [15] M. Ramji y R. Prasath, «Sensitivity of isoclinic data using various phase shifting techniques in digital photoelasticity towards generalized error sources» Optics and Lasers in Engineering, n° 49, pp. 1153-1167, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.05.007>
- [16] S. Yoneyama, M. Shimizu, J. Gotoh y M. Takashi, «Photoelastic Analysis with a Single Tricolor Image» Optics and Lasers in Engineering, n° 29, pp. 423-435, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(97\)00107-3](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(97)00107-3)
- [17] A. Ajovalasit, G. Petrucci y M. Scafidi, «Review of RGB photoelasticity» Optics and Lasers in Engineering, n° 68, p. 58.73, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.12.008>
- [18] J. Briñez de León, H. Fandiño, A. Restrepo y J. Branch, «Análisis de resolución en imágenes de fotoelasticidad: caso carga dinámica,» VISIÓN ELECTRÓNICA, vol. 11, n° 1, 2017. <https://doi.org/10.14483/22484728.12789>
- [19] D. Swain, J. Philip y A. Pillai, «A modified regularized scheme for isochromatic demodulation in RGB photoelasticity» Optics and Lasers in Engineering, vol. 61, pp. 39-51, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.04.009>
- [20] J. A. Quiroga y G.-P. J. A. García-Botella, «Improved method for isochromatic demodulation by RGB calibration» Applied optics, vol. 41, n° 17, pp. 3461-3468, 2002. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003461>
- [21] B. N. Simon, T. Kasimayan y K. Ramesh, «The influence of ambient illumination on colour adaptation in three fringe photoelasticity» Optics and Lasers in Engineering, vol. 49, n° 2, pp. 258-

- 264, 2011.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.09.018>
- [22] A. Ajovalasit, S. Barone y G. Petrucci, «Towards RGB photoelasticity: full-field automated photoelasticity in white light» *Experimental Mechanics*, vol. 35, n° 3, pp. 193-200, 1995. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00571.x>
- [23] D. Swain, B. Thomas, J. Philip y A. Pillai, «Novel calibration and color adaptation schemes in three-fringe RGB photoelasticity» *Optics and Lasers in Engineering*, n° 66, pp. 320-329, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2014.10.007>
- [24] A. Ajovalasit, G. Petrucci y M. Scafidì, «RGB photoelasticity: review and improvements» *Strain*, n° 46, pp. 137-147, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2008.00571.x>
- [25] B. N. Simon, T. Kasimayan y K. Ramesh, «The influence of ambient illumination on colour adaptation in three fringe photoelasticity» *Optics and lasers in engineering*, vol. 49, n° 2, pp. 258-264, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.09.018>
- [26] K. Ramesh y A. Pandey, «An improved normalization technique for white light photoelasticity» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 109, pp. 7-16, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.05.004>
- [27] P. M. Ch, V. Ramakrishnan y R. Krishnamurthi, «Assessment of fringe pattern normalisation for twelve fringe pgoelasticity,» *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, vol. 3, pp. 295-299, 2017. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41600-7_37)
- [28] M. M. D. P. Sudharshan Duth, «Color detection in RGB modeled images using MATLAB» *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, pp. 29-33, 2018. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.31.13391>
- [29] The MathWorks, Inc., «Understanding Color Spaces and Color Space Conversion» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/help/images/understanding-color-spaces-and-color-space-conversion.html>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [30] V. Ramakrishnan y K. Ramesh, «Scanning schemes in white light photoelasticity - part i: Critical assessment of existing schemes» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 92, pp. 129-140, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.06.016>
- [31] K. Ramesh, V. Ramakrishnan y R. C., «New initiatives in single-colour image-based fringe order estimation in digital photoelasticity» *Journal of Strain Analysis*, pp. 1-17, 2015. <https://doi.org/10.1177/0309324715600044>
- [32] V. Ramakrishnan y K. Ramesh, «Scanning schemes in white light photoelasticity - Part II: Novel fringe resolution guided scanning scheme» *Optics and Lasers in Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.05.010>
- [33] D. Trejo, *Software de fotoelasticidad RGB en placas de materiales birrefringentes al esfuerzo*, Tesis de maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., Chihuahua, Chih., 2021.
- [34] K. Ramesh y A. Pandey, «Development of a New Normalization Technique for Twelve Fringe Photoelasticity (TFP),» *Advancement of Optical Methods & Digital Image Correlation in Experimental Mechanics*, vol. 3, pp. 177-180, 2018. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97481-1\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97481-1_23)



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



# Development of interactive gadgets: pedagogical, methodological and ergonomic aspects for industrial design

## *Desarrollo de gadgets interactivos: aspectos pedagógicos, metodológicos y ergonómicos para el diseño industrial*

Alejandro Daniel Murga González , Génesis Rubí Nájera Morga , Camilo Caraveo Mena 

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México

**Corresponding author:** Alejandro Daniel Murga González, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. E-mail: [alejandro.murga@uabc.edu.mx](mailto:alejandro.murga@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0002-5840-1822.

**Received:** September 20, 2021

**Accepted:** December 12, 2021

**Published:** December 16, 2021

**Abstract.** - *The Industry 4.0 is a consequence of the evolution in technological advances, which has allowed and the use of new tools for simulation, digital integration, fabrication flexibility, and personalization to achieve new product design solutions. The importance and actuality of this revolution have had a great impact on the engineering and design education system, and this is the case of the Faculty of Engineering and Technology Sciences (FCITEC), from the Autonomous University of Baja California (UABC), where the implementation of gadget prototyping has been encouraged. This ongoing work is intended to delineate the methodological, pedagogical, and ergonomic aspects of gadget prototyping with platforms such as Arduino and NodeMCU, and its benefits to the Industrial Design (ID) Discipline. It is a project that started in 2018 with the scope of understanding interactivity, usability, and multidisciplinary collaboration, which are key for a designer's profile. In this sense, User-Centered Design methodology is used as a framework for usable product development, with the aid of task, interface, and housing design. Specific tools of particular interest are persona design, interface analysis, and cognitive architecture outline. Important results so far include 1) student-made prototypes, 2) usability workshops in international congresses, 3) intellectual property registration, and 4) academic course designs.*

**Keywords:** User centered design; Usability; Gadget prototyping; Arduino; NodeMCU.

**Resumen.** - *La Industria 4.0 es consecuencia de la evolución de los avances tecnológicos, que ha permitido el uso de nuevas herramientas para la simulación, integración digital, flexibilidad y personalización de fabricación para lograr nuevas soluciones de diseño de productos. La importancia y actualidad de esta revolución ha tenido un gran impacto en el sistema educativo de ingeniería y diseño, y este es el caso de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (FCITEC), de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), donde se ha fomentado la implementación de prototipos de dispositivos. Este trabajo en curso tiene como objetivo delinear los aspectos metodológicos, pedagógicos y ergonómicos de la creación de prototipos de dispositivos con plataformas como Arduino y NodeMCU, y sus beneficios para la disciplina de diseño industrial (ID). Es un proyecto que se inició en 2018 con el objetivo de comprender la interactividad, la usabilidad y la colaboración multidisciplinaria, que son claves para el perfil de un diseñador. En este sentido, la metodología de Diseño Centrado en el Usuario se utiliza como marco para el desarrollo de productos usables, con la ayuda del diseño de tareas, interfaces y carcasas. Las herramientas específicas de particular interés son el diseño de personas, el análisis de interfaces y el esquema de arquitectura cognitiva. Los resultados importantes hasta ahora incluyen 1) prototipos hechos por estudiantes, 2) talleres de usabilidad en congresos internacionales, 3) registro de propiedad intelectual y 4) diseño de cursos académicos.*

**Palabras clave:** Diseño centrado en el usuario; Usabilidad; Prototipos de gadget; Arduino; NodeMCU.



## 1. Introduction

The development of interactive gadgets such as wearable devices and similar products bring diverse fields together, such as software engineering, industrial design, mechatronics, and others; and thus, require collaborative multidisciplinary action, which the electronics industry has mastered and is yet to be consolidated in pre-grad education. Authors [1-12] that come from computer science disciplines and psychology have outlined frameworks such as User Centered Design (UCD), Human-Computer Interaction (HCI) and Cognitive Ergonomics, and established rules for interface design that are yet to be assimilated by ID students.

For that reason, at the Autonomous University of Baja California (UABC) in the ID Department academics are beginning to adopt methodological and pedagogical approaches to work with platforms such as Arduino and NodeMCU [13-17]. This ongoing work is intended to delineate the **methodological, pedagogical and ergonomic** aspects of gadget prototyping with this platform, and its benefits to the ID discipline. It is an academic and curricular project that started in 2018 with the scope of understanding interactivity, usability and multidisciplinary collaboration, which are key for the designer’s profile. In this sense, UCD methodology [18-22] is used as a framework for usable product development, with the aid of task, interface and housing design. Specific tools of particular interest are persona design, interface analysis and cognitive architecture outline. Important results so far include 1) student-made prototypes, 2) usability workshops in international congresses, 3) intellectual property registration, and 4) academic course designs.

To illustrate the aforementioned, a student-made prototype is presented. The project is called

“Music House”, a preschooler/early elementary toy designed for learning letters and words. In this work the user centered design methods implemented are described and the pedagogical framework that supports them is outlined.

## 2. Theoretical framework and pedagogical aspects

It is convenient to mention the theoretical base that supports this study. On the one hand, the Systems Theory [23-24]; and Cybernetics and Communication Theory [25-26] provide guiding concepts such as interactivity, input, output and feedback. On the other hand, Ergonomics [27] help narrow down the interacting elements human-object-task-environment within a system, where overall performance and human wellbeing are major goals. These concepts are part of the base of design fields such as Experience Design, Emotional Design, Interaction Design and UCD, and help to analyze the human-gadget interaction (Figure 1).

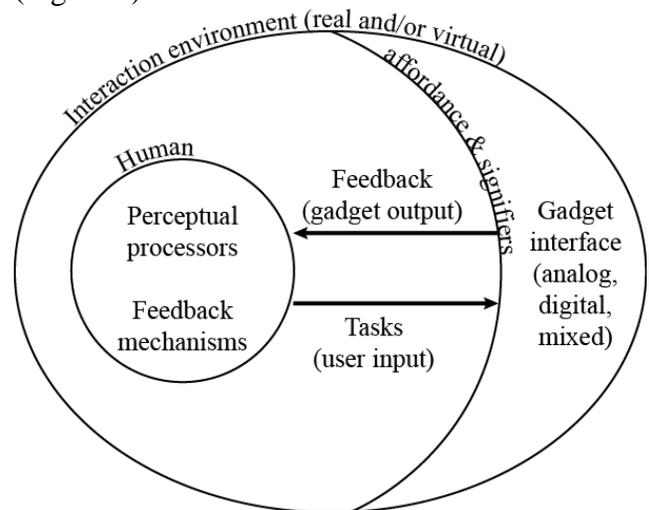


Figure 1. Human-gadget interaction representation.

The Human-gadget interaction representation was developed on 2019 by professors in the ID department at FCITEC and has served as a research/educational outline for students in order to understand ergonomic systems where



interaction and communication flow are key analytical concepts; and has helped to build the pedagogical material for the courses “Usability Assessment for Industrial Designers” and “Gadget Development and Prototyping”, which are currently offered at the faculty, subjects that are unique from the design perspective and are not offered in other campuses for the ID program. This is particularly important because gadget prototyping is not common in the ID programs in Mexico.

### 3. Methodology: prototype development

“Music House” is a gadget prototype that was developed along the teaching of four courses of the Industrial Design program at UABC FCITEC: Design Workshop V, Design Methodology III, Usability Assessment for Industrial Designers, and Gadget Development and Prototyping. Throughout these courses several user research methods applied in the field of design were implemented in order to develop fully functional technological devices. These methods come from diverse disciplines such as software design, ergonomics and UX/UI design, which include cognitive task analysis, user personas and cognitive architecture modelling; and are used to analyze and design user interfaces. Some of these methods are described in their application to develop “Music House” as follows.

#### 3.1 User Personas

Considering the amount of information traces that internet users leave, it is expected to be used as input for product and service design. With this in mind, user personas [28-29] represent large segments of the population that share qualities that are translated to design decisions that will help the product to be successful in desirability, functionality, and other aspects. It can be said that “Personas are based on the behaviors and

motivations of real people we have observed and represent them throughout the design process” [30, p. 75].

Personas, along with documentary research, were used to define the “Music House” users, narrowed down as 4-7-year-old infants, preschoolers and early elementary schoolers that are learning how to write. Learning in this age group is often aided with ludic exercises and games, which consist in pattern learning through music, images and symbols.

With these characteristics in consideration, the principal concern in “Music House” is the child’s cognitive development, centered in the emergent alphabetization process, that is to say reading and writing as activities that emerge within the child and occur in relation to language experiences. For that reason, it is advisable to have (or design) an interactive environment [31].

Children from 3-5 years of age experience a rapid development of linguistic, socioemotional and cognitive competences; and for that reason it is important to promote the use of creativity and imagination with learning stimuli through playful activities, singing and reading [32]. This is the base for “Music House” user requirements, that pointed to a musical toy that helps to learn words through kinetic, acoustic and visual activities.

#### 3.2 Cognitive Task Analysis

Cognitive task analysis (CTA) methods are used to understand the complexity of user activities and are widely used across disciplines. In ID, CTA are used as a non-empirical usability method to help the designer outline the relationship between the interface (digital or analog) and the user. With this information, it will be clearer to define the quantity of steps to perform a task and the interaction with controls (i.e. buttons, handles, etc.). According to Klein



and Armstrong [33] CTA methods are highly adaptable and adjustable because they are used to make new discoveries every time, which means that the phenomena of interest are not well known at the outset of the research.

According to Jordan [34, p. 73] “task analyses alone refer to the physical steps or the physical interaction user-object, and are verbalized in notations (i.e. tasks broken in sub-elements and how the measure of the task complexity is

derived)”. These methods are used to investigate whether its interface demonstrates the design properties of consistency and compatibility.

CTA was used in “Music House” to help the ID student define step by step the playful tasks before exploring in depth the interface design. Activities such as the use of cards to play music and the use of chips to build words were firstly outlined and analyzed with this method in order to make them coherent and fluid (Figure 2).

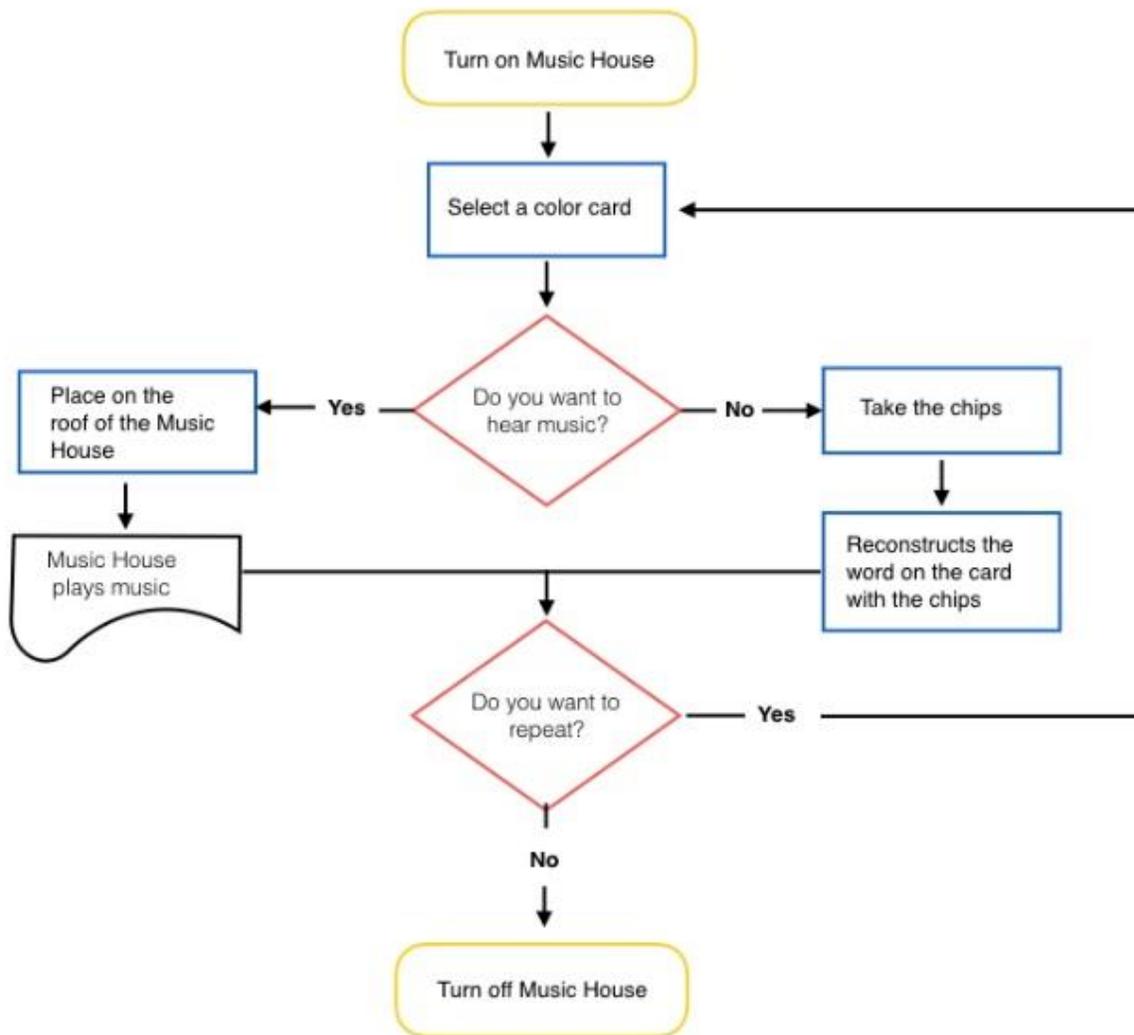


Figure 2. Cognitive task analysis of Music House flowchart.



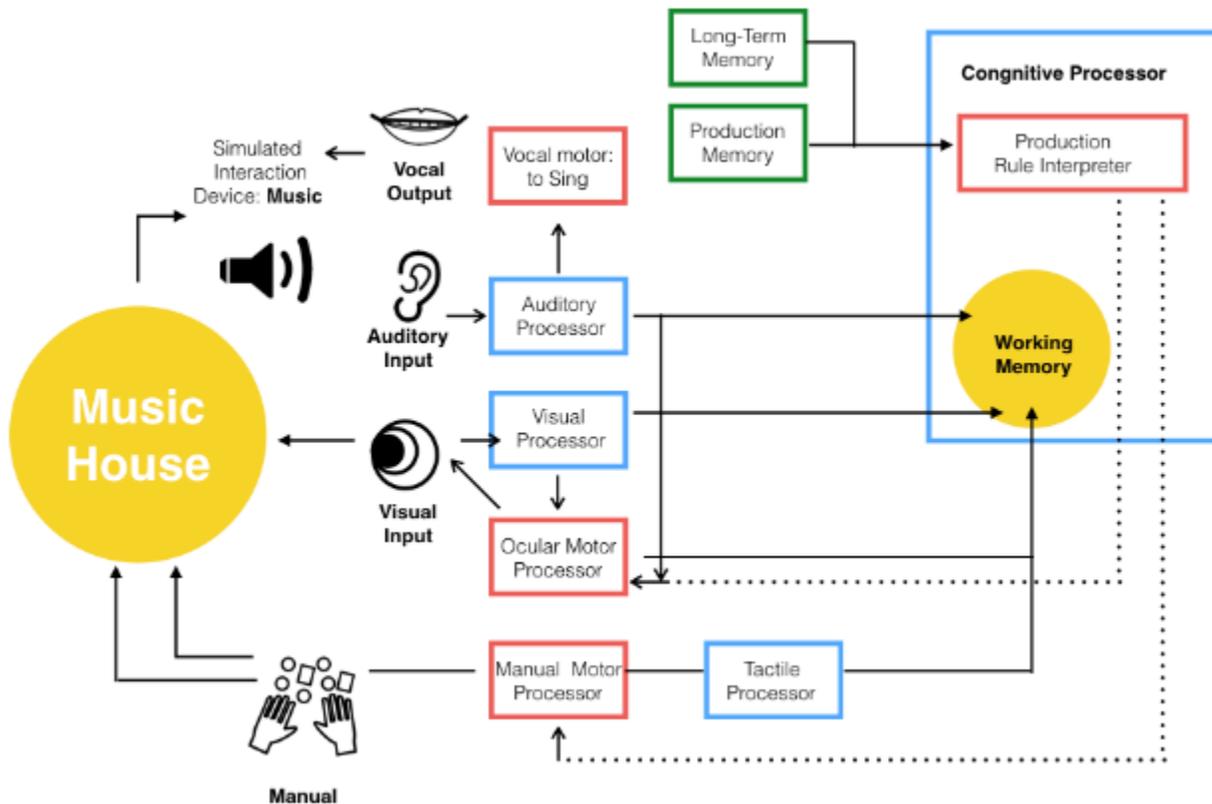
With this in mind, objective of “Music House” as a pedagogical toy is to learn to relate letters with words and objects. The child is supposed to choose a color card and place it on the top of the toy to reproduce a song about objects that match the color of the cards, as shown in Figure 2. The flowchart illustrates the tasks and decisions that the user makes interacting with the toy.

### 3.3 Cognitive architecture modelling

For product design, modelling the cognitive architecture [35-36] allows to visualize the physical interactions between the user and the object’s interface in terms of communication, highlighting the flow of information that is needed to complete the task. In that sense, designers can identify the user sensory channels in order to create suitable optical, haptic and acoustical interactions.

The “EPIC (Executive/Process-Interactive Control) is a cognitive architecture especially suited for modeling human multimodal and multiple-task performance” [37, p. 391].

The EPIC architecture was used in “Music House” as a tool for linking the user’s sensory channels with physical parts (i.e. buttons, handles, grips, etc.) and helped to make design decisions for the affordances: for example, choosing flashing buttons, because they seem inviting; or implementing an invisible interface (i.e. interactions happen without touching the object) for the cards, which are presented over a mark on the house’s roof in order to play the music, because a kinetic activity helps as a complement for learning (Figure 3).



**Figure 3.** Cognitive architecture representation of the “Music House” project, developed with Arduino done by a student, based on [37].



The cognitive architecture in “Music House”, as shown in the Figure 3, is modelled considering the flow of information based on cues and repetitions in order to assist the child in its learning process at this early stage. In other words, “Music House” *tells* the child how to pronounce letters and words by saying them out loud.

### 3.4 Interface analysis and design

The interface design in “Music House” includes the analysis of the principles and elements of design that have impact in the user’s sensory channels in terms of sounds, images, tactile experiences and others. This analysis considers linguistic (verbal) and non-linguistic (haptics, optics, acoustics, proxemics, kinetics, and other) signs. Modifiers of these signs include tone, velocity, intensity, balance, emphasis, harmony, variety, gradation (Figure 4).

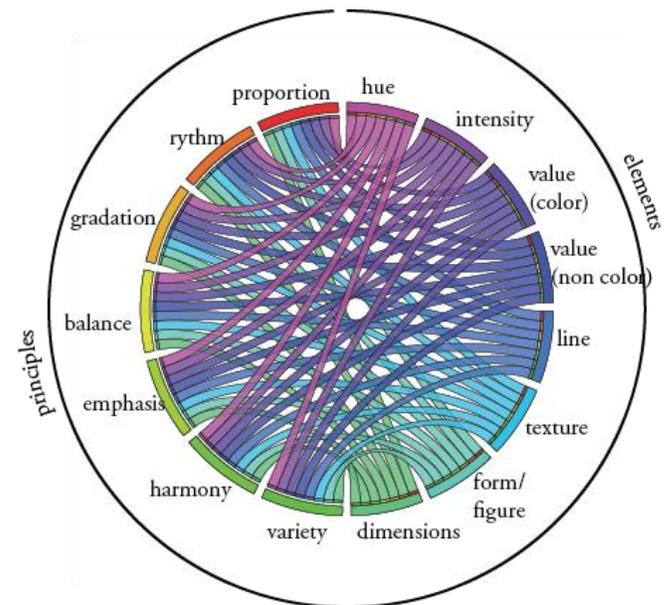
Particularly speaking, design elements that have impact in the optical aspect are color, shape/figure, line, texture and space. With this in mind, a designer can make conscientious decisions of how the interface will be configured to provide the desired experience, for instance: a non-linguistic optical sign such as the red color in a light alarm can have a great impact in communicating a warning.

The interface analysis in “Music House” serves as a complement for the cognitive architecture modelling because it widens design possibilities for interface elements. In this case, it helps to decide about the type of music, lettering, symbols, colors, combining principles and elements of design.

In this case, “Music House” only presents colors in the drawings and in the buttons, leaving the rest of the toy with the natural material appearance, with the purpose of making an

emphasis to the sources of information to draw the user’s attention. Also, drawings, letters and the general housing present curvy lines, forms and figures to denote the playful aspect of the toy.

Non-linguistic outline			
Haptics/ Acoustics/ Optics	Proxemics	Kinetics	Other signs
Speakers, cards, buttons, lights, textures, colors	Toy dimensions and disposition in space	Movements with music	Symbols
Linguistic outline			
Verbal		Paralinguistic	
Written (cards) Oral (speakers)		Tone, velocity intensity in voice (speakers)	



**Figure 4.** Non-linguistic and linguistic outlines in “Music House”, based on [38] / Possible combinations of principles and elements of design.



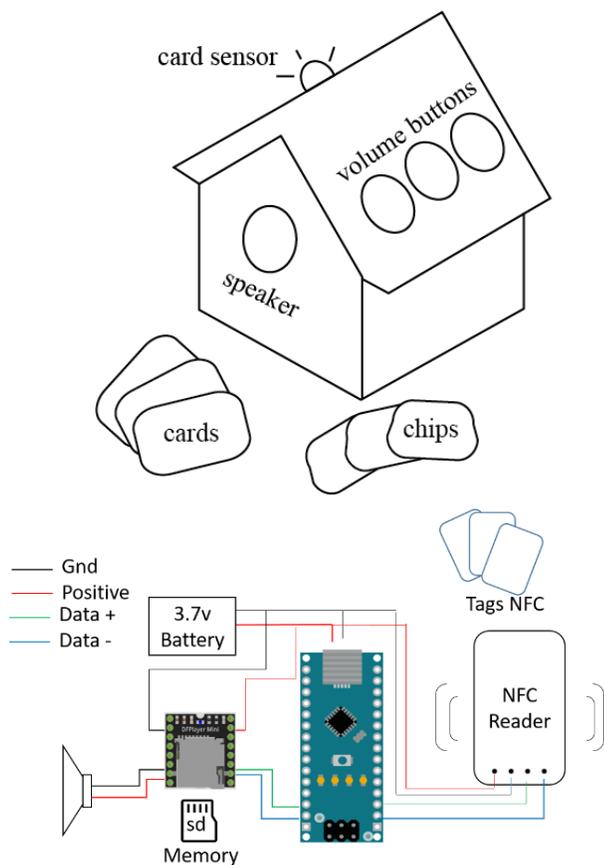
#### 4. Fabrication and ergonomic aspects of prototyping in ID education

As shown in the Figure 5, “Music House” consists of a house-shaped box that contains a speaker, volume buttons and a sensor to detect cards that activate the reproduction of sounds and music related to words and letter pronunciation. On the one hand, the housing is small for the user to manipulate and transport with ease and is designed based on geometric figures. On the other hand, the cards have either drawing of animals based on primary and secondary colors or letters with simple yet playful typography. Said cards have rounded angles for safety and are shaped in trapezes to connect letters and thus form words.

The prototype is fabricated with Medium-density fiberboards (MDF) through Computer Numerical Control (CNC) machining for its housing; and with extruded polylactide (PLA) for 3D printed accessories such as handles. Prefabricated electronic elements were used along with the Arduino microcontroller. These materials were selected according to the feasibility of manufacture in the faculty’s facilities and considering the user’s safety. Being specific, MDF and PLA are nontoxic low-cost materials that are easy to handle in rapid prototyping.

In terms of the electronic prototyping, the integration was done with Arduino and with *Tinkercad* [39], a free-of-charge, online 3D modeling program that runs in a web browser, that is being used in schools as a pedagogical tool, and allows the students to simulate connections and functions without the risk of damaging the physical components (Figure 5).

The use of educational tools such as Arduino and Tinkercad can be seen as ergonomic in the aspect of design practice because they assist the rapid prototyping of electronics in several ways: it makes the development shorter, it allows to test before prototyping, and allows to understand the integration better, as it gives a clear idea of how the final pre-production prototype will look like. Being specific, and under the usability concepts of effectivity (accomplishment), efficiency (resources) and satisfaction (learning), “Music House” proves to be a project that helps to understand complex concepts with few resources -materials and working tools can be provided at FCITEC; and finish a complete project in 4 months. “Music House” serves as an educational ID material for future student projects, helping them to understand basic electronic principles, dimensions, and integration.



**Figure 5.** Music House diagram / The electronic prototyping was done with the pedagogical platform *Tinkercad* and Arduino.



## 5. Results

The result of this project is a fully functional prototype which can be categorized considering three variables: housing design, electronic building and integration. These categories are based on the Industrial Designers Society of

America (IDSA) [40] taxonomy, which helps to clarify the differences between several types of models and prototypes. As the Figure 6 shows, the Music House prototype has a medium complexity in housing design and is located in an early stage of development in electronics prototyping and overall integration.

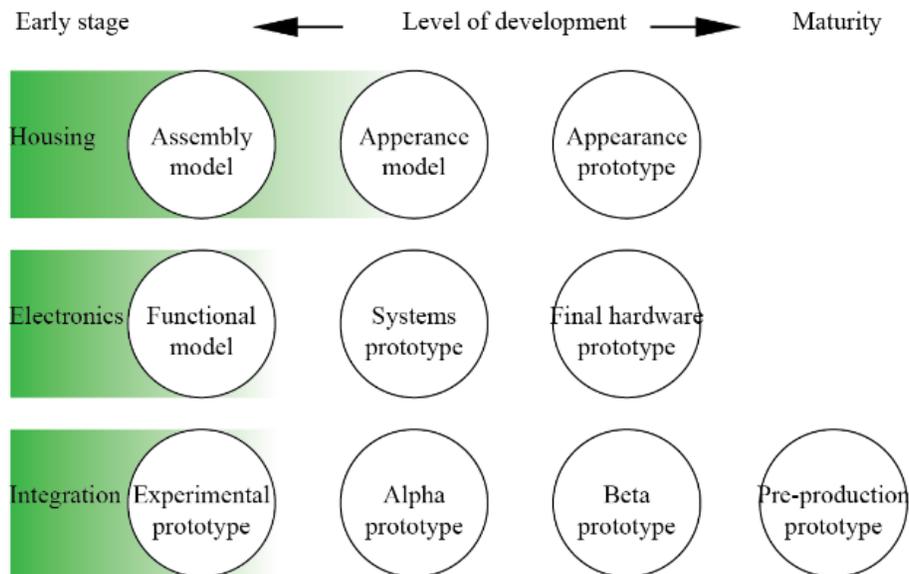


Figure 6. Level of complexity of Music House prototype based on the IDSA taxonomy.

### 5.1 Methodological, pedagogical and ergonomic contributions

“Music House” project serves three purposes: first, and on the pedagogical aspect, it helped to unify the theories and concepts of the courses Design Workshop V, Industrial Design Methodology III, Usability Assessment for Industrial Designers and Gadget Development and Prototyping in one single project. This helps to guide students and motivate them to carry on projects like this, as they can produce enough information to structure a pregrad thesis project. Second, and in the methodological aspect, it helped to structure an instructional design for

gadget prototyping. Also, it will help to document future similar projects based on gadget prototyping using these UCD methods under the ID perspective. It is worth mentioning that for there is a lack of pedagogical material for this discipline in terms of designing with platforms such as Arduino or NodeMCU. In this sense, “Music House” lays a precedent in terms of education and methodology.

Third, and on the ergonomic aspect, “Music House” adapts ergonomic methods that are common in UX (software) design to analog interface design, and illustrates how cognitive ergonomics is put into practice from the ID perspective.



This project documents every process of the product design process, from a multidisciplinary perspective, including areas from cognitive ergonomics, UI/UX design and manufacturing. The contribution is to have brought these methods from different disciplines into one academic project and its use as teaching material in the industrial design curriculum for interactive product development. With this in mind, the aim is to structure a formal methodology for this discipline and allow the future designers to create fully functional gadgets by themselves with the user centered design perspective.

The actual paradigm of the design process taught in universities overlooks the user interaction and experience. It is not that it is regarded as unimportant, but because there is little work with electronics, which can be used as a tool to illustrate concepts that inform user research and come from other disciplines such as algorithms, tasks, interaction, cognition, etc.

Since 2018, electronic prototyping has been encouraged at UABC to enhance the designer's professional profile and its benefits become visible through many aspects. For instance, in March 2019, a usability workshop was carried out in the International DI Integra Congress, organized by the national association of Industrial Design schools. Students from several universities nationwide attended the workshop to reflect on the importance of user testing and had the opportunity to evaluate electronic prototypes made by UABC students (Figure 7). The activities were based in the course Usability Assessment for Industrial Designers, that is actually offered in the Engineering and Technology Sciences Faculty at UABC.

Also, it is important to mention the technical documents such as plans and other industrial drawings made for "Music House" are being evaluated to be subject of intellectual property

protection by the National Institute of Copyright in Mexico.



**Figure 7.** Usability workshop UABC with student-made prototypes. Photography taken by Andrea Lozano López (andrea.loz1997@gmail.com).

All of this has made an impact in the new study plan for the Industrial Design program at UABC which is now active, and aims to be at the forefront in terms of working with the industry 4.0 technology.

## 6. Conclusions

The "Music House" project contributes in the ID discipline in pedagogical, methodological and ergonomic aspects. First, the human-gadget interaction research/educational outline serves an approach for research and design activities related to gadget design. It strengthens the ID curriculum and allows to offer unique courses at FCITEC. Second, the design methodology used for this project helped to define the user profile, outline the basic user activities, select affordances and design the analog interface:

- (1) The User Persona method clarified how the user characteristics research laid the base of the user requirements.
- (2) The Cognitive Task Analysis, helped to outline the basic playful activities of the toy.



(3) The Cognitive architecture modelling aided in deciding the broad physical design aspects of the toy (i.e. use of flashing buttons and implementation of an invisible interface).

(4) The Interface analysis helped to choose and combine design principles and elements to make specific decisions in the ergonomic, communicative, and aesthetical aspects.

Third, the modelling, simulation and fabrication tools prove to be feasible for rapid prototyping in the ID program, helps the student to succeed in building a conceptual prototype as learning evidence, and makes the pedagogic strategy in design ergonomic to understand complex concepts in a short time and with few resources.

The importance of teaching students a multidisciplinary approach to the design process is key to overcoming the product design paradigm, limited to traditional industrial processes. The industry nowadays needs professionals that can make possible the dialogue between design and engineering in terms of rapid prototyping of technological devices. Tijuana, like many other Mexican cities, is shifting from solely product assembly towards local product design. Also, in the frame of the industry 4.0., Industrial Designers will be required to know basic aspects of electronics and programming.

This has been the case of the Industrial Design program at FCITEC, that offers 9 engineering and 3 design programs, which allows the students to easily generate multidisciplinary projects, with the aid of professors with diverse backgrounds., Professors formed in the areas of architecture, industrial design and software design participated in for this particular project.

The scope of these efforts is to continue expand the ID professional credentials to adapt to the new 4.0 industry requirements. Specifically, it is planned to keep on developing digital gadgets at

FCITEC for several reasons: (1) structure a pedagogical handbook for designers; (2) keep on registering industrial designs and promote the transfer of technology and knowledge; (3) and apply this design and fabrication methodology on different types of gadgets in order for its enhancement.

As a final remark, it is convenient to say that teaching digital prototyping to design students will not only make them suitable to the developing job market, which asks more digital and technological competencies, but will enable them to start new business and self-employ.

## 7. Acknowledgment

To the Faculty of Engineering Science and Technology, for providing the facilities and also to the teachers and students for participating in the development of this technological project.

## 8. Authorship acknowledgment

*Genesis Rubí Nájera Morga:* Conceptualización, Recursos, Ideas, Análisis formal, Investigación, Escritura, Análisis de datos, Revisión y edición. *Alejandro Daniel Murga González:* Conceptualización, Recursos, Ideas, Análisis formal, Investigación, Escritura, Análisis de datos, Revisión y edición. *Camilo Caraveo Mena:* Metodología, Investigación, Análisis de datos, Revisión y edición.

## References

- [1] Cheriton, D. R. "Man-machine interface design for timesharing systems", Proceedings of the 1976 annual conference. ACM, pp. 362-366. October 1976. <https://doi.org/10.1145/800191.805617>



- [2] Norman, D. A. "Design rules based on analyses of human error", *Communications of the ACM*, 26(4), 254-258, 1983. <https://doi.org/10.1145/2163.358092>
- [3] Smith, S. L., & Mosier, J. N. "Guidelines for designing user interface software" (No. MTR-10090). Bedford, MA: Mitre Corporation, 1986. <https://doi.org/10.21236/ADA177198>
- [4] Shneiderman, B. "Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction". Pearson Education India, 2010. <https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Shneiderman-Designing-the-User-Interface-Strategies-for-Effective-Human-Computer-Interaction-6th-Edition/PGM327860.html>
- [5] Marlin, C., & Brown, L. "Human-computer interface design guidelines". Ablex Pub.: Norwood, NJ, 1988. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/38160>
- [6] Hollnagel, E. Cognitive ergonomics: it's all in the mind. *Ergonomics*, 40(10), 1170-1182, 1997. <https://doi.org/10.1080/001401397187685>
- [7] Durso, F. T., Nickerson, R. S., Dumais, S. T., Lewandowsky, S., & Perfect, T. J. (Eds.). *Handbook of applied cognition*. John Wiley & Sons, 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470713181>
- [8] Molich, R., & Nielsen, J. Improving a human-computer dialogue. *Communications of the ACM*, 33(3), 338-348, 1990. <https://doi.org/10.1145/77481.77486>
- [9] Neisser, U. Multiple systems: A new approach to cognitive theory. *European Journal of Cognitive Psychology*, 6(3), 225-241, 1994. <https://doi.org/10.1080/09541449408520146>
- [10] Norman, D. A. *User centered system design: New perspectives on human-computer interaction*. CRC Press, 1986. <https://doi.org/10.1201/b15703>
- [11] Rowlands, M., & Mark, R. *The body in mind: Understanding cognitive processes*. Cambridge University Press, 1999. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511583261>
- [12] Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M. S., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. *Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction*. Pearson, 2016.
- [13] Al Dahoud, A., & Fezari, M. *NodeMCU V3 For Fast IoT Application Development*. Notes, 2018.
- [14] Peláez, J. P. *Internet de las cosas (IoT) con Arduino. Manual práctico. de NodeMCU*, Madrid, Paraninfo, 5-8, 2019
- [15] Kurniawan, A. *Internet of Things Projects with ESP32: Build exciting and powerful IoT projects using the all-new Espressif ESP32*. Packt Publishing Ltd., 2019
- [16] Hoddie, P., & Prader, L. *IoT Development for ESP32 and ESP8266 with JavaScript: A Practical Guide to XS and the Moddable SDK*. Apress, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5070-9>



- [17] Monk, S. Programming Arduino: getting started with sketches. McGraw-Hill Education, 2016.
- [18] Abras, C., Maloney-Krichmar, D., & Preece, J. User-centered design. Bainbridge, W. Encyclopedia of Human-Computer Interaction. Thousand Oaks: Sage Publications, 37(4), 445-456, 2004.
- [19] Bevan, N. International standards for usability should be more widely used. Journal of Usability studies, 4(3), 106-113, 2009.
- [20] Maguire, M., Kirakowski, J., & Vereker, N. (1998). RESPECT: User centred requirements handbook.
- [21] Maguire, M. (2001). Context of use within usability activities. International journal of human-computer studies, 55(4), 453-483. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0486>
- [22] Maguire, M. (2001). Methods to support human-centred design. International journal of human-computer studies, 55(4), 587-634. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0503>
- [23] Gibson, J. E. How to do systems analysis (Vol. 47). John Wiley & Sons, 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470130599>
- [24] Stichweh, R. (2008). Systems Theory. Retrieved April 1, 2015, from [http://www.fiw.uni-bonn.de/de-mokratieforschung/personen/stichweh/pdfs/80\\_stw\\_systems-theory-international-encyclopedia-of-political-science\\_2.pdf/view](http://www.fiw.uni-bonn.de/de-mokratieforschung/personen/stichweh/pdfs/80_stw_systems-theory-international-encyclopedia-of-political-science_2.pdf/view)
- [25] von Bertalanffy, L. General system theory: foundations, development, applications (Rev. ed.). New York: GBraziller, 1973.
- [26] Wiener, N. Cybernetics; or, Control and Communication in the animal and the machine. (2d ed.). New York, MITPress, 1961. <https://doi.org/10.1037/13140-000>
- [27] EA. Definition and Domains of ergonomics | IEA, 2000. Website. Retrieved September 8, 2015, from <http://www.iea.cc/whats/index.html>
- [28] Miaskiewicz, T., & Kozar, K. A. (2011). Personas and user-centered design: How can personas benefit product design processes? Design studies, 32(5), 417-430. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.03.003>
- [29] Moser, C., Fuchsberger, V., Neureiter, K., Sellner, W., & Tscheligi, M. (2012). Revisiting personas: the making-off for special user groups. In CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (pp. 453-468). <https://doi.org/10.1145/2212776.2212822>
- [30] Cooper, A., Reimann, R., & Cronin, D. "About face 3: the essentials of interaction design". John Wiley & Sons, 2007.
- [31] Navarro, E. B. Alfabetización emergente y metacognición. Revista signos, 33(47), 111-12, 2000. <https://doi.org/10.4067/S0718-09342000000100010>
- [32] UNICEF. (2017, October). Aprendizaje a través del juego. 2021, de UNICEF Available: <https://www.unicef.org/sites/default/files/2019>



[-01/UNICEF-Lego-Foundation-Aprendizaje-a-traves-del-juego.pdf](#)

[33] Klein, G., Armstrong, A. "Critical Decision in Human factors methods: a practical guide for engineering and design "in Handbook of human factors and ergonomics methods. CRC Press, 2017.

[34] Jordan, P. An introduction to usability. CRC Press, 2020. <https://doi.org/10.1201/9781003062769>

[35] Kieras, D. E. A summary of the EPIC Cognitive Architecture. The Oxford handbook of cognitive science, 1, 24, 2016. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199842193.013.003>

[36] Byrne, M. D. (2007). Cognitive architecture. In The human-computer interaction handbook (pp. 119-140). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781410615862.ch5>

[37] Kieras, D. E., & Meyer, D. E. An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. Human-Computer Interaction, 12(4), 391-438, 1997. [https://doi.org/10.1207/s15327051hci1204\\_4](https://doi.org/10.1207/s15327051hci1204_4)

[38] Rizopoulos, C., & Charitos, D. Implications of theories of communication and spatial behavior for the design of interactive environments. In 2011 Seventh International Conference on Intelligent Environments (pp. 92-99). IEEE, 2011. <https://doi.org/10.1109/IE.2011.57>

[39] Kelly, J. F. 3D Modeling and Printing with Tinkercad: Create and Print Your Own 3D Models. Que Publishing, 2014.

[40] Evans, M. How they do it, International Designers Society of America, IDSA. Accessed on: September. 20, 2021. [webpage]. Available: <https://www.idsa.org/education/how-they-do-it>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)