

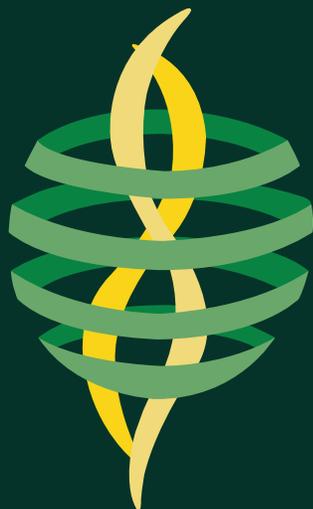
RESERVA DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO DE TITULO No. 04-2018-070614032000-203

VIGENCIA 06/07/2021 A 06/07/2022

ACTUALIZACIÓN 13/12/2021

ISSN 2594-1925

a cargo de la FCITEC



RECIT

REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS

VOLUMEN 5 CAPÍTULO 1

ISSN: 2594-1925



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

2022

Enero-Marzo



Monitoreo térmico de barrera vertical con vegetación, evaluando el desempeño a través de la experimentación y herramienta de simulación

Thermal monitoring of vertical barrier with vegetation, evaluating performance through experimentation and simulation tool

Carmiña Elizabeth Domínguez Cicorio ¹, Luis Aaron García Solorzano ¹, Raúl Pavel Ruíz Torres ²

¹División de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México, Av. Tecnológico No.1 Villa de Álvarez, Colima, México

²Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Chiapas, Blv. Belisario Domínguez Km. 1081, Terán, 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Autor de correspondencia: Carmiña Elizabeth Domínguez Cicorio, División de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México, Av. Tecnológico No.1 Villa de Álvarez, Colima, México. E-mail: carmidominguez@gmail.com. ORCID: 0000-0001-5512-0657

Recibido: 16 de Abril del 2021 **Aceptado:** 16 de Diciembre del 2021 **Publicado:** 7 de Enero del 2022

Resumen. - A consecuencia del calentamiento global y el deterioro ambiental del cual somos víctimas, se considera necesaria la innovación arquitectónica a través del diseño sostenible, y valorar los efectos térmicos positivos de la vegetación en la integración a la misma. El propósito de este trabajo fue investigar el uso de la vegetación como barrera vertical como estrategia bioclimática y evaluar su desempeño en un módulo experimental; la metodología utilizada fue realizando un monitoreo experimental y utilizando la herramienta de simulación térmica, en ambos casos, para comprobar el aporte al mejoramiento de la calidad ambiental con la disminución de la temperatura interior. Los resultados permitieron demostrar la reducción de la temperatura del aire interior, concluyendo que con el resultado obtenido se busca una alternativa ecológica, promoviendo la renovación y depuración del aire como estrategia proyectual. Tomando en cuenta que cada acción puede tener consecuencias ambientales y a favor de la disminución del consumo energético, a causa la climatización artificial. La investigación está apoyada en el beneficio de las herramientas utilizadas para la simulación térmica, como instrumentos de planificación urbana y arquitectura sustentable, ya que a través de éstas se pueden evaluar las distintas alternativas de diseño, pronosticando el comportamiento térmico de zonas ya construidas o no, sin la necesidad de trabajos exhaustivos de campo.

Palabras clave: Barreras verticales; Vegetación; Simulación.

Abstract. - As a result of global warming and the environmental deterioration of which we are victims, architectural innovation through sustainable design is considered necessary, and the positive thermal effects of vegetation in its integration are considered necessary. The purpose of this work was to investigate the use of vegetation as a vertical barrier as a bioclimatic strategy and to evaluate its performance in an experimental module; The methodology used was carrying out an experimental monitoring and using the thermal simulation tool, in both cases, to verify the contribution to the improvement of the environmental quality with the decrease of the interior temperature. The results allowed to demonstrate the reduction of the indoor air temperature, concluding that with the result obtained an ecological alternative is sought, promoting the renewal and purification of the air as a project strategy. Taking into account that each action can have environmental consequences and in favor of reducing energy consumption, due to artificial air conditioning. The research is supported by the benefit of the tools used for thermal simulation, as instruments for urban planning and sustainable architecture, since through these it is possible to evaluate the different design alternatives, predicting the thermal behavior of areas already built or not, without the need for extensive field work.

Keywords: Vertical barriers; Vegetation; Simulation.



1. Introducción

La Guía de la Convención sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto [1] , señala que ante la situación actual sobre el cambio climático, se prevé un incremento en las temperaturas y condiciones climáticas severas a nivel mundial. Sumado a lo mencionado Vargas Robles [2] expresa que es necesidad y prioridad el diseño de acciones y procesos de adaptación que posibiliten prepararse ante la incidencia del cambio climático, ya que la región a la que pertenece México, presenta preocupantes procesos de degradación y, considerando lo expuesto por Peña Barrera [3] México pertenece a la región de América Latina y el Caribe, la cual conjunta muchas de las riquezas ecológicas y ambientales del planeta.

Por otra parte cabe resaltar y como señala Hernández [4] , la arquitectura sostenible es la creación de espacios a partir del diseño y la edificación, donde deben aplicarse criterios y condiciones del desarrollo sustentable, por lo que los recursos naturales, económicos y humanos se deben manejar de forma a reducir el daño ambiental, la contaminación del suelo, del agua (y su consumo) y del aire, mejorando el confort interno y externo (preferentemente de manera pasiva). Adicionalmente, Sosa y Siem [5] señalan que con la ayuda de masas de vegetación, a través del sombreado de paredes y techos con arbustos, árboles, pérgolas y otros elementos, se puede mejorar el microclima de un espacio, reduciendo las ganancias de calor.

Asimismo, en el Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico [5] , se resalta la importancia de la vegetación que se coloca en elementos verticales ya que absorbe la radiación solar, aísla térmicamente, y al mismo tiempo refresca el aire que circunda, por medio de la transpiración del vapor de agua que realizan las plantas. Además

de satisfacer la necesidad instintiva de protección del ser viviente, contribuyen a la mejora del ambiente físico inmediato. La superficie viscosa de las hojas de las plantas captura el polvo y filtran el aire. Del mismo modo, la vegetación asegura la privacidad visual y disminuye los efectos del deslumbramiento [6].

Por lo mencionado, en este trabajo se plantea un enfoque metodológico para la determinación de temperaturas en los espacios con y sin vegetación, realizando una comparación cuantitativa del desempeño entre ambos, a través de la herramienta de simulación térmica EnergyPlus y mediante la experimentación con la construcción de módulos auto-portantes. Se busca demostrar los cambios de temperaturas que se pueden producir con la implementación de vegetación y el diseño sustentable en barreras verticales, evaluando su desempeño como regulador térmico y comparando los resultados obtenidos.

Por lo tanto:

- Primeramente se realizó el diseño y la construcción de prototipos en campo para la experimentación; por medio de la elaboración de dos módulos auto-portantes, uno con la implementación de vegetación y el otro como testigo (sin vegetación) a modo de evaluar la temperatura ambiente promedio de los espacios interiores y el exterior.
- Simultáneamente se realizó el diseño y la construcción de prototipos en el software de simulación Energy Plus, el cual fue seleccionado por ser de acceso gratuito y por ofrecer la posibilidad de obtener variables de salida como la temperatura interna de cada zona y temperaturas superficiales.
- Y por último la comparación de los resultados obtenidos de temperaturas, mediante la experimentación y mediante la simulación.



Para la elección de la vegetación se tuvieron en cuenta las especies endémicas de la ciudad de Colima, a través de la consulta directa a viveros; además, como menciona Gómez-Azpeitia [7] por su uso eficiente como control climático en la misma; y, como señala Fajardo [8], en base a la experiencia de los especialistas empíricos, se desarrolla muy rápido y es altamente resistente al clima. Por lo mencionado se propone la elaboración de paneles adaptados a la flora nativa, con el uso de la especie *Cissus*, por ser además una especie de rápido crecimiento y de geometría regular que contribuye a la reducción del espacio requerido para su instalación, condiciones necesarias para el desarrollo del trabajo propuesto. Estas son plantas trepadoras que pueden ser cultivadas como enredaderas o como plantas colgantes, y se pueden encontrar abundantemente en algunas zonas de México, especialmente en estados como Chiapas y Colima; de fácil cultivo y mantenimiento, generosas en desarrollar hojas y ramas.

Beltrán-Melgarejo et al. [9] realizaron una investigación sobre el confort térmico de techos verdes con *Cissus verticillata* (Vitaceae) en viviendas tropicales en Veracruz, México, donde el prototipo disminuyó hasta 4.5° C la temperatura promedio de las láminas de zinc de las habitaciones. Las variables utilizadas para evaluar el confort térmico arrojaron resultados con una mejora del confort térmico debido al techo verde. Por otra parte, Fajardo [8] en su tesis *Desempeño costo – beneficio de dos sistemas pasivos de climatización en cubiertas para climas cálidos – sub húmedo. Caso Coquimatlán, Colima*, investigó el potencial de la enredadera *Cissus* para controlar la ganancia de calor que pasa a través de las cubiertas para dicha localidad. El resultado presentó dificultades para su crecimiento, a pesar de los cuidados y ayuda especializada para estimular y acelerar su desarrollo, teniendo un bajo desempeño; generando como nueva pregunta de

investigación, si fue la forma horizontal o el material (concreto) de la losa lo que afectó el crecimiento de *Cissus* en la cubierta plana.

Por otra parte, con relación a la selección del software de simulación y considerando el estudio realizado por J. Cárdenas et al. [10], el cual expone que la herramienta de simulación energética con mayor representatividad es EnergyPlus (34%), y se encuentra validado por la norma ASHRAE 140 [11], se opta por la misma en la etapa de experimentación, debido a las características de resultados necesarios para la simulación y el análisis de los módulos autoportantes construidos. El software Energy Plus, como hace mención Casa Arredondo [12], es un programa de código abierto y uso gratuito que permite realizar simulaciones térmicas y energéticas de las edificaciones, basándose en un modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo. Por su parte, Flores Condori [13] resalta entre las posibilidades que permite la herramienta:

- Soluciones integrales para cada zona térmica.
- Climatización y movimiento de corrientes de aire simultáneamente en zonas.
- Intervalos de tiempo que se pueden definir por el propio usuario.
- Cálculo de balances térmicos en las superficies combinado radiación y convección.

Por lo expuesto y como consecuencia de búsquedas recientes, el enfoque del trabajo responde a analizar el desempeño térmico de las barreras verticales con vegetación, evaluadas a través de la experimentación en campo y la simulación, para demostrar su eficiencia en el mejoramiento de la calidad del ambiente. En este trabajo se plantea utilizar la vegetación para la mitigación de la radiación solar y que resulte en ambientes agradables, junto con la posibilidad de aprovechar la capacidad de proporcionar sombra y usarlo como sistema de amortiguamiento



térmico del edificio próximo; en respuesta a lo mencionado por Fuentes Freixanet [14], el sombreado es la primera estrategia de enfriamiento y es una de las más eficaces para evitar el sobrecalentamiento de los espacios.

2. Metodología

Se plantea a la metodología de trabajo como mixta de carácter exploratorio, método analítico y tipo de estudio comparativo correlacional; que tiene como propósito medir el grado de relación que existe entre dos o más conceptos o variables. La periodicidad de estudio fue transversal, debido a que los registros de las variables se hicieron en un momento predeterminado de tiempo. Para obtener los resultados acordes a los objetivos del presente trabajo se recurre a los modelos computacionales que actúan como simuladores, ya que representan el comportamiento térmico del espacio ya construido y delimitado, cuya validez de resultados del modelo simulado se basa en el grado de ajuste de predicciones con el comportamiento del caso real monitoreado.

El proceso metodológico incluye:

- Evaluación experimental para determinar el desempeño térmico de la barrera con vegetación, a partir de la construcción de módulos auto-portantes.
- Evaluación a través de la simulación aplicada al caso real con la herramienta Energy Plus.
- Simulación del escenario propuesto según porcentaje de vegetación y orientación.
- Evaluación y comparación de resultados obtenidos.

2.1 Área de estudio

- Caracterización climática del sitio y descripción del área: el área de estudio se ubica en el estado de Chiapas, dentro de los Estados Unidos Mexicanos, en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, entre las coordenadas 16°45'11" N, 93°6'56" W, dentro de Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapa.

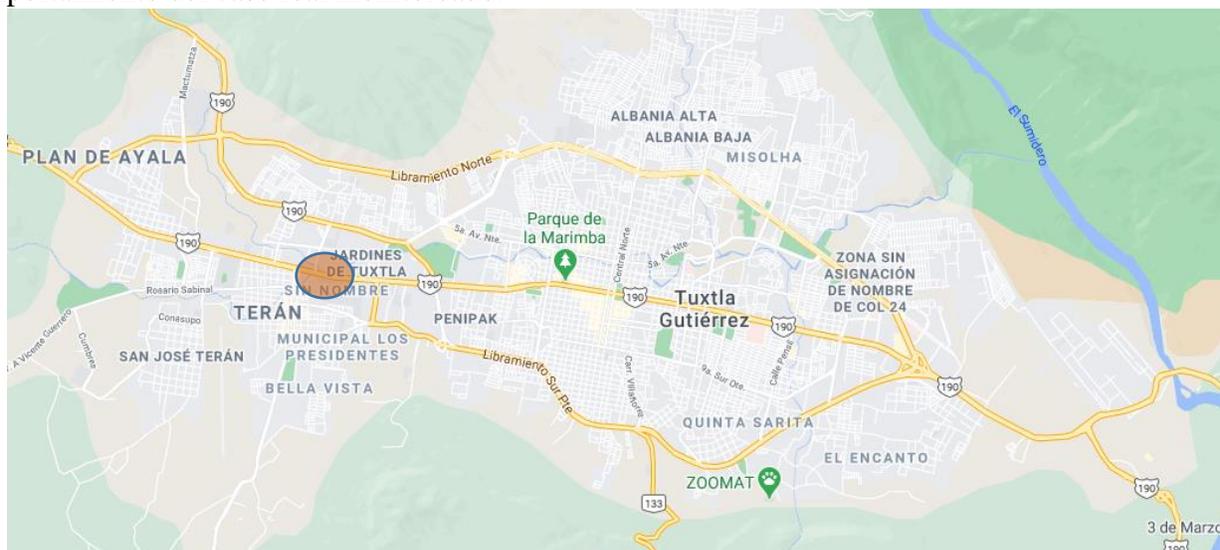


Figura 1. Ubicación de la UNACH en Tuxtla Gutiérrez (tomado de Google Earth. INEGI 2020).



El sitio de implantación se ubica en la franja tropical y se caracteriza por el clima cálido sub húmedo, Aw en la clasificación de Köppen-García. Los veranos son mucho más lluviosos que los inviernos y la temperatura media anual oscila los 20 °C. El sitio se ubica dentro del

campus universitario, cuyo entorno presenta baja densidad de construcción ya que los edificios alrededor del mismo no superan los 3 pisos de altura; en una zona de uso educativo, comercial y residencial.



Figura 2. Clasificación Köppen-García para México (tomado de <http://cbtf5.mx.tripod.com/unidad4.htm>).

2.2 Población y muestra

El espacio escogido es el exterior, sobre la cubierta superior de uno de los bloques del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables, el cual fue seleccionado por las características particulares

que posee las cuales se consideran deseables para lo establecido en el planteamiento de la investigación. El mismo tiene techo verde, se encuentra a una altura de 3 metros y forma parte del conjunto de espacios abiertos exteriores del campus, rodeado de bloques de aulas, áreas verdes con árboles y césped.

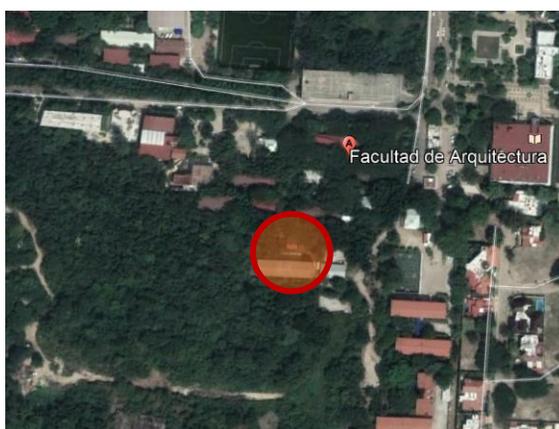


Figura 3. Ubicación de los bloques del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables (tomado de Google Earth. INEGI 2020).



Durante las dos primeras semanas del experimento, los módulos auto-portantes fueron colocados sobre techo losa. Debido al calentamiento de la superficie se modificó la ubicación sobre el techo verde existente a un

lado, en el mismo sector. La decisión de colocar en el techo responde a evitar la manipulación de las personas y que no obtuviera sombreado de ningún elemento preferentemente constructivo.



Figura 4. Ubicación de los módulos auto-portantes en el Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables.

- Descripción del modelo físico.
Caracterización formal y material:

Módulos auto-portantes: se utilizaron dos módulos auto-portantes con 5 placas de poliestireno expandido de 1 pulgada de espesor y estructura de madera de 40 x 40 cm. Se procedió a la colocación de vegetación (tipo Cissus) en la

cara Sur de uno de los módulos, para evaluar el desempeño de la misma en el clima cálido sub-húmedo, mientras que el otro módulo actuó de testigo (sin vegetación en la cara Sur). El registro de datos se realizó mediante registradores de datos (Data Logger) situados en el interior de los módulos.



Figura 5. Estructura de los módulos. Placas de poliestireno expandido con estructura de madera.



Figura 6. Estructura de alambre recocido N° 18, colocada a uno de los módulos para la fijación de la vegetación.



Figura 7. Sensores de temperatura colocados en el interior de cada módulo.

Vegetación: para generar la barrera vegetal se consideró cubrir una superficie aproximada del 80% de la cara sur de uno de los módulos, por lo

que se colocaron 4 plantas del tipo *Cissus*, proveídas por vivero local.



Figura 8. Vegetación tipo *Cissus* colocada a uno de los módulos.

Registadores de datos: fueron colocados equidistantemente en el interior de ambos módulos. Se realizó la medición de los datos,

siendo evaluados solamente los de la temperatura interior y temperatura exterior



Figura 9. Registrador de Datos (Data Logger) de uso Interior para Temperatura, Humedad Relativa, Luz y un canal para sensores Externos.

2.3 Determinación de variables

Por una parte, las variables están determinadas por dos categorías: las condiciones del ambiente natural, que se refieren a los factores climáticos meteorológicos; y, el ambiente artificial urbano-arquitectónico (módulos auto-portantes), que hace referencia al ambiente construido y de la influencia sobre la forma física y material del espacio y su entorno inmediato.

2.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

El experimento tuvo una duración total de 4 semanas, desde el 10 de noviembre de 2020 al 08 de diciembre de 2020. Cabe resaltar que el periodo de duración responde en gran parte a la pandemia ocasionada por el Covid19 y las restricciones consecuentes como la disponibilidad del uso de instalaciones y equipo de monitoreo.

2.5 Metodología de modelación y simulación

El modelado para proporcionar la estructura de los módulos, a través del diseño 3D, se realizó con el software SketchUp y para la ejecución de la simulación se utilizó el motor de cálculo

Energy Plus el cual proporciona los resultados o variables de salida. Ver tabla 1.

Tabla 1. Trabajo realizado para modelar y simular los módulos.

Herramienta	
SketchUp	Creación de: Modelado genérico – Tipos de espacios – Zonas térmicas
EnergyPlus	Creación y asignación de materiales, cargas, ubicación, horarios. Motor de simulación.

A partir de la configuración física del modelo en SketchUp, el cual fue utilizado en este trabajo para definir la orientación, la geometría, el diseño, la composición y la definición de los espacios y envolventes; se crean con el plugin de EnergyPlus en el mismo, las zonas térmicas configurándose todas las superficies que delimitan la envolvente de los módulos en estudio. Una vez terminado el diseño y guardado con extensión. IDF, el cual es uno de los archivos de entrada para el EnergyPlus, se ingresan el archivo de clima del sector con extensión. EPW y las diferentes variables de entrada en Energy Plus con la determinación de la ubicación geográfica, la caracterización de los materiales, las infiltraciones, las variables de salida, los



periodos de simulación, los horarios, entre otros. En la tabla 2 se especifican los datos de entrada en EnergyPlus.

Tabla 2. Se describen algunos datos de entrada utilizados en el trabajo para la modelación y simulación.

Datos de entrada	
EP-Launch	
Archivo de entrada (Input File)	Archivo .IDF creado en SkechtUp con el plugin de EnergyPlus
Archivo Meteorológico (Weather File)	Archivo .EPW correspondiente a la localización geográfica del caso de estudio
IDF Editor	
Versión	EnergyPlus 8.7
Control de Simulación	Ejecutar la simulación para un archivo climático determinado (EPW)
Características de los módulos	Nombre, ángulo de orientación (0°), tipo de terreno: ciudad (city), distribución solar: interior y exterior.
Localización	Nombre de la ciudad, latitud, longitud, zona horaria y altura
Materiales	Nombre: Poliestireno, rugosidad: lisa (smooth), espesor: 0.0254m, conductividad térmica: 0.035W/mk, densidad: 50kg/m3, calor específico: 1400J/kgK. Las propiedades del material fueron tomados de Materiales y Diseño Bioclimático [15].
Construcciones	Paredes, pisos y techos: Poliestireno

Finalmente se ejecutó la simulación y se corrigieron errores obteniendo como salida la tabla de datos en formato .CSV. Cabe resaltar que la aplicación de estrategia en el módulo de prueba se realizó considerando el mismo porcentaje cubierto en la experimentación (80%), ya que la herramienta no cuenta con la opción de simular con las propiedades térmicas favorables

del efecto de la fotosíntesis de la vegetación. La simulación fue realizada con módulos de 3.00 x 3.00 x 3.00 mts por estar dentro del rango de las dimensiones de un espacio habitable determinado por la CONAVI [16] y porque las simulaciones realizadas, para este trabajo, con módulos de menores dimensiones a la misma no arrojaron resultados comparables.

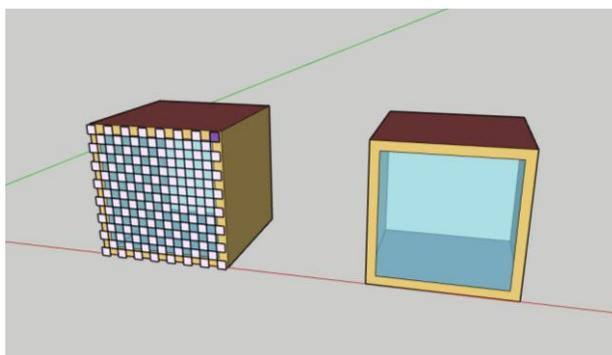


Figura 10. Digitalización de módulos de 3.00x3.00x3.00mts. en el programa SketchUp, con el plugin de EnergyPlus.



3. Resultados y Discusiones

Se presentan los resultados obtenidos durante las dos etapas, dentro de los módulos experimentales y la simulación. Cabe resaltar que el periodo utilizado en la simulación esta en correspondencia a los días utilizados en la experimentación en campo.

3.1 Experimentación

Con relación a la experimentación en campo, las temperaturas obtenidas al interior del módulo auto-portante con barrera vegetal (módulo prueba) fueron menores que las del módulo testigo. En la tabla 3 se muestran las temperaturas máximas y mínimas al exterior y al interior de ambos dispositivos, durante el periodo total de experimentación.

Tabla 3. Comparación de temperatura interior y exterior promedio del periodo total de experimentación. Diferencia entre módulos.

Temperatura	Tmin °C	Tprom.°C	Tmax. °C
Exterior	16.3	23.7	32.8
Módulo Prueba	15.4	25.06	47
Módulo Testigo	15.4	26.1	49

Se concluye que la diferencia entre las temperaturas ambiente exterior y los módulos testigo y prueba se debe a la radiación solar y el volumen de los módulos, lo que permitió alcanzar las temperaturas obtenidas; cabe resaltar la reducción de temperatura en el módulo con vegetación contra el testigo. Como los módulos no se encuentran con la superficie descubierta o cara abierta expuesta a los vientos dominantes, se produce un estancamiento, por lo que se deduce que las ganancias térmicas por radiación y conducción en el poliestireno generan una convección interior. Es importante considerar factores que generaron condiciones micro climáticas en el interior, como la radiación directa reflejada en el interior de los módulos por las superficies y el calor transferido a pesar de ser un material aislante.

A partir de los resultados de las temperaturas obtenidas en los módulos, se seleccionó 1 día por semana para un análisis más detallado, y considerar aquel de mayor diferencia de temperaturas entre el módulo testigo y el de prueba como se observa en la tabla 4 y en la figura 11.



Tabla 4. Comparación de resultados del experimento en temperaturas máximas obtenidas por semana.

		TESTIGO			CON VEGETACION			Diferencia entre temperaturas máximas
		Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	
SEMANA 1 10/11/2020 17/11/2020	10/11/2020	22.178	30.5288333	44.012	22.417	28.842	40.228	3.784
	11/11/2020	18.628	29.2231458	47.32	18.937	27.5286458	44.999	2.321
	12/11/2020	21.604	28.4404583	47.548	21.652	27.1261875	41.065	6.483
	13/11/2020	20.46	28.0139375	45.405	20.603	26.9981042	41.59	3.815
	14/11/2020	20.889	28.3735833	45.154	20.984	27.1950833	42.564	2.59
	15/11/2020	21.223	28.408125	46.099	21.413	27.4485208	42.773	3.326
	16/11/2020	21.795	25.5948542	38.282	21.915	25.0608542	36.012	2.27
	17/11/2020	20.436	28.3292708	45.217	20.531	27.5390625	46.995	-1.778
SEMANA 2 18/11/2020 24/11/2020	18/11/2020	21.079	25.9520833	40.257	20.913	25.3494583	40.057	0.2
	19/11/2020	19.96	22.4559167	27.259	19.865	21.93275	25.162	2.097
	20/11/2020	20.079	24.7302708	35.422	20.079	23.681	30.9	4.522
	21/11/2020	20.984	27.744875	46.577	20.746	25.7565625	39.601	6.976
	22/11/2020	21.199	27.2546667	44.75	21.223	25.6897708	40.92	3.83
	23/11/2020	20.007	25.5285208	42.356	20.198	24.4031042	39.205	3.151
	24/11/2020	19.436	27.7872083	46.162	19.579	25.7649167	38.449	7.713
SEMANA 3 25/11/2020 01/12/2020	25/11/2020	18.509	28.6557292	48.205	18.604	26.973875	43.982	4.223
	26/11/2020	20.103	28.4973333	46.609	20.246	27.1306875	41.268	5.341
	27/11/2020	20.341	28.8812292	48.238	20.412	27.4519375	42.803	5.435
	28/11/2020	22.561	29.2217083	49.039	22.537	27.9564792	44.503	4.536
	29/11/2020	21.246	28.5379583	47.028	21.246	27.4442292	42.773	4.255
	30/11/2020	20.174	25.7958333	42.386	20.174	25.2276458	38.7	3.686
	01/12/2020	18.176	22.246375	36.715	18.271	21.7722292	33.6	3.115
SEMANA 4 02/12/2020 08/12/2020	02/12/2020	15.438	25.7432708	47.941	15.414	24.2761042	40.114	7.827
	03/12/2020	17.653	22.0806667	29.439	17.677	21.621125	28.617	0.822
	04/12/2020	19.413	23.1788125	39.008	19.294	22.6708333	36.254	2.754
	05/12/2020	18.58	23.9357083	44.288	18.533	22.9954792	37.728	6.56
	06/12/2020	19.579	22.3737708	30.343	19.508	22.0823958	28.568	1.775
	07/12/2020	16.701	20.8234583	29.19	17.225	20.6719583	27.702	1.488
	08/12/2020	16.01	20.5362917	32.021	16.63	20.3867292	29.265	2.756

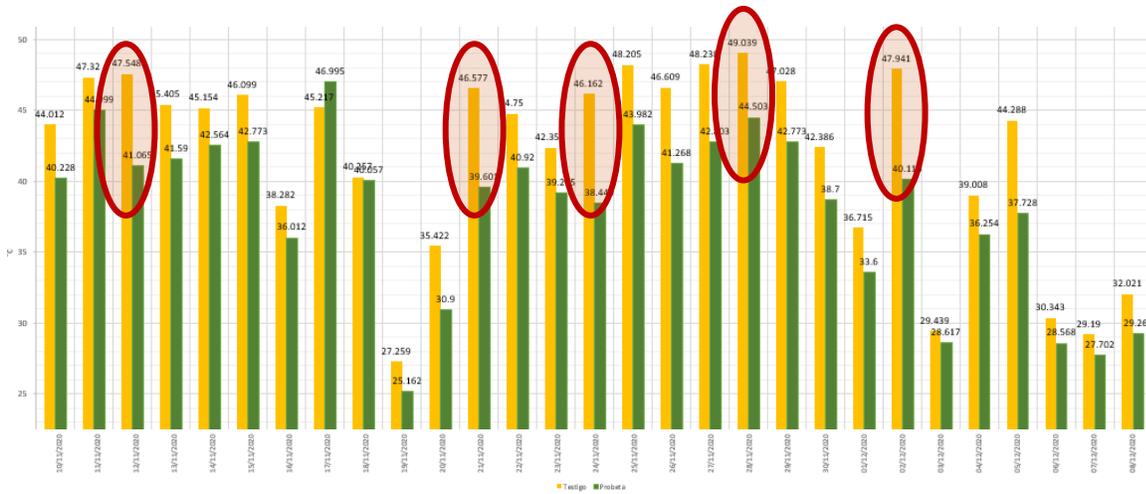


Figura 11. Comparación de los resultados del experimento en temperaturas máximas obtenidas por semana.

La diferencia en las máximas temperaturas promedio en general entre los módulos de prueba y el de testigo es de 2°C (tabla 3) pero se pueden

observar mayores diferencias en días y horas de mayor temperatura ambiental como se puede observar en las figuras 12, 13, 14, 15 y 16.

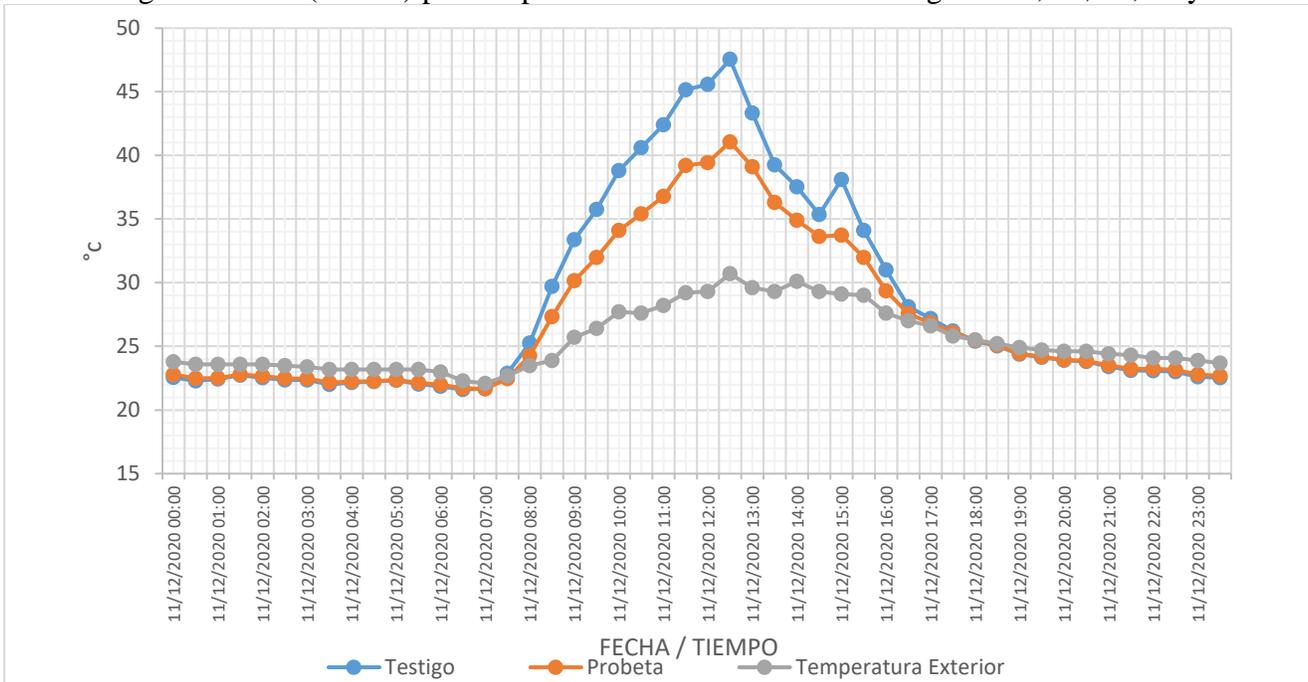


Figura 12. Comparación de resultados del experimento en el día seleccionado, el 12 de noviembre, de la semana 1. Se observa una diferencia de hasta 6.5°C entre el testigo y el módulo de prueba a las 12:30 horas, siendo el módulo con vegetación el que presenta menor temperatura.

Como puede observarse en la figura 12, es notable las temperaturas del aire que se logran alcanzar en el módulo testigo, siendo una temperatura que supera las temperaturas del ambiente exterior, esto debido al volumen del módulo y la orientación al sur que se colocó la

abertura, por tal motivo el módulo capta la radiación solar directa e indirecta influyendo en el aumento de las temperaturas del aire. Lo relevante es que el módulo con barrera vegetal se logra reducir hasta 6.5 °C en la temperatura del aire.

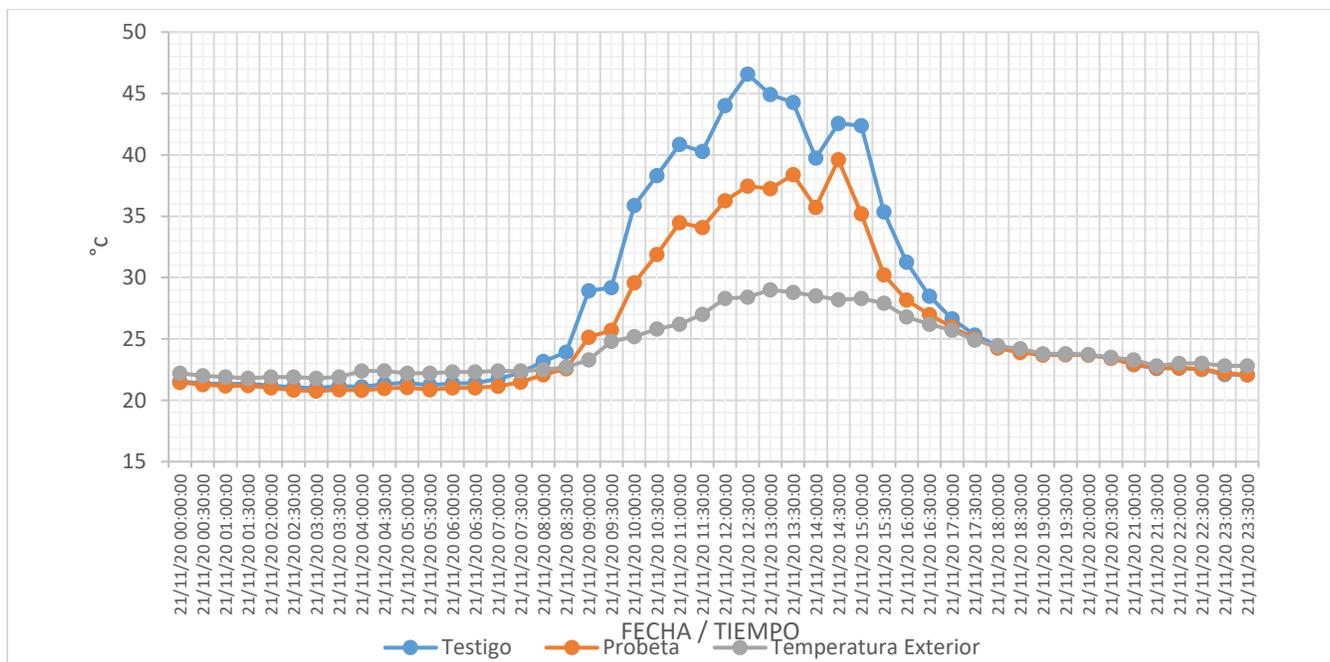


Figura 13. Comparación de resultados del experimento en el día seleccionado, el 21 de noviembre, de la semana 2. Se observa una diferencia de hasta 6.98°C entre el testigo y el módulo de prueba a las 12:30 horas, siendo el módulo con vegetación el que presenta menor temperatura.

En la figura 13, se observa que en el módulo con barrera vegetal, para este día se logró disminuir 6.8°C, cabe mencionar que se trabajaron con gráficas en días con condiciones de cielo despejado, aunque se puede notar que entre las

14 hrs y 15 hrs existió un poco de nubosidad. Esto fue para identificar bajo condiciones críticas el desempeño térmico en el módulo con la barrera vegetal.

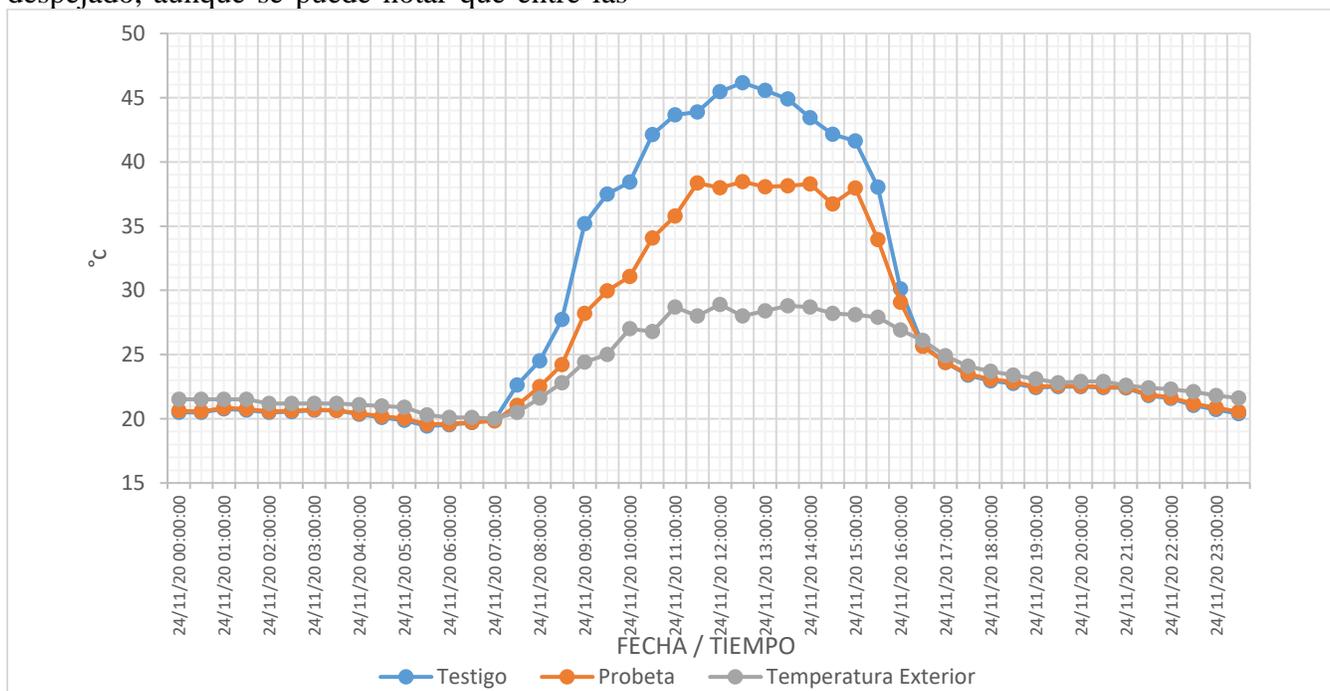


Figura 14. Comparación de resultados del experimento en el día seleccionado, el 24 de noviembre, de la semana 2. Se observa una diferencia de hasta 7.7°C entre el testigo y el módulo de prueba a las 12:30 horas, siendo el módulo con vegetación el que presenta menor temperatura.



En este caso de la figura 14, se observa que se logró disminuir hasta 7.7°C, en base a esto podemos ver que la barrera vegetal permite ser

una estrategia pasiva que reduce sustancialmente la ganancia por radiación solar directa e indirecta.

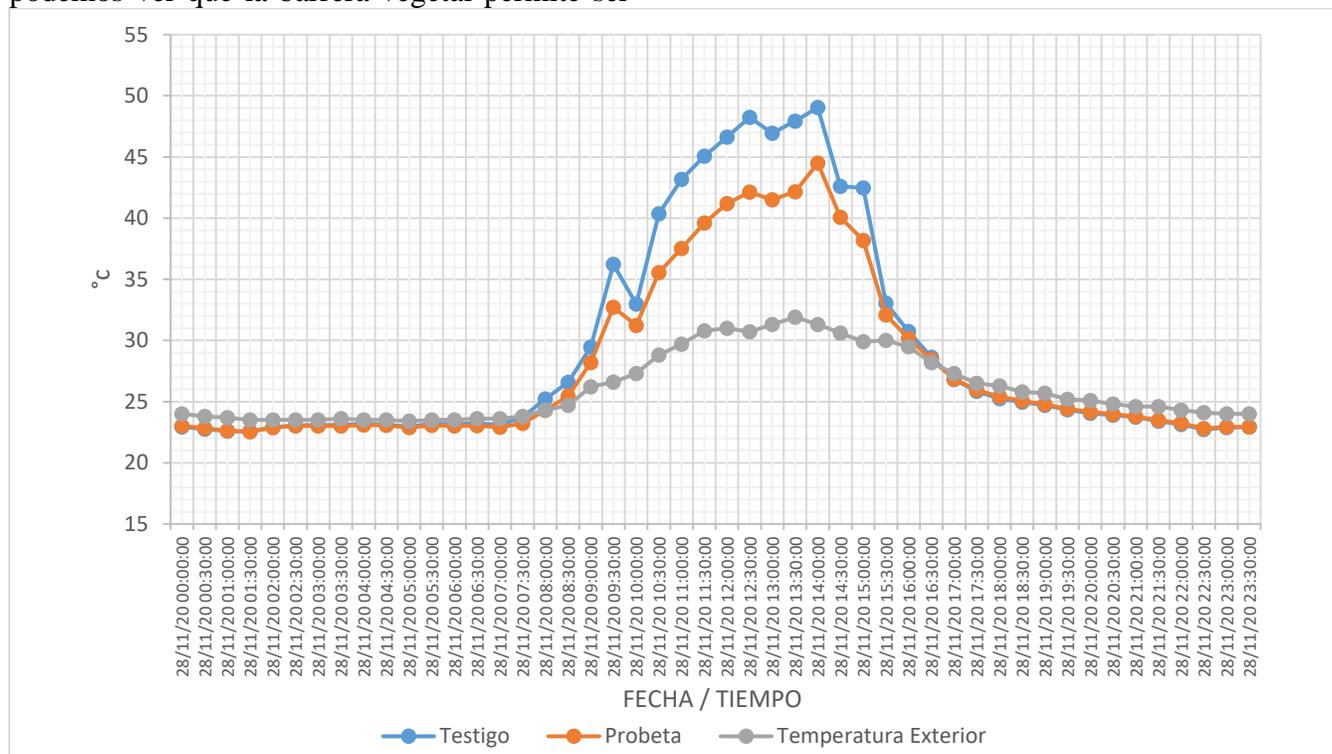


Figura 15. Comparación de resultados del experimento en el día seleccionado, el 28 de noviembre, de la semana 3. Se observa una diferencia de hasta 4.5°C entre el testigo y el módulo de prueba a las 14:00 horas, siendo el módulo con vegetación el que presenta menor temperatura.

En la figura 15 aprovechamos en mencionar cómo desde que empieza el amanecer, se observa que la temperatura del aire interior del módulo testigo comienza a elevarse con respecto al módulo testigo, esta es una de las razones que nos permitió inferir que la variable relevante es la

radiación solar directa e indirecta, ya que esta diferencia se aprecia sólo durante el día, mientras que en la noche las temperaturas del aire son idénticas entre el módulo testigo, el módulo con barrera vegetal y la temperatura exterior.

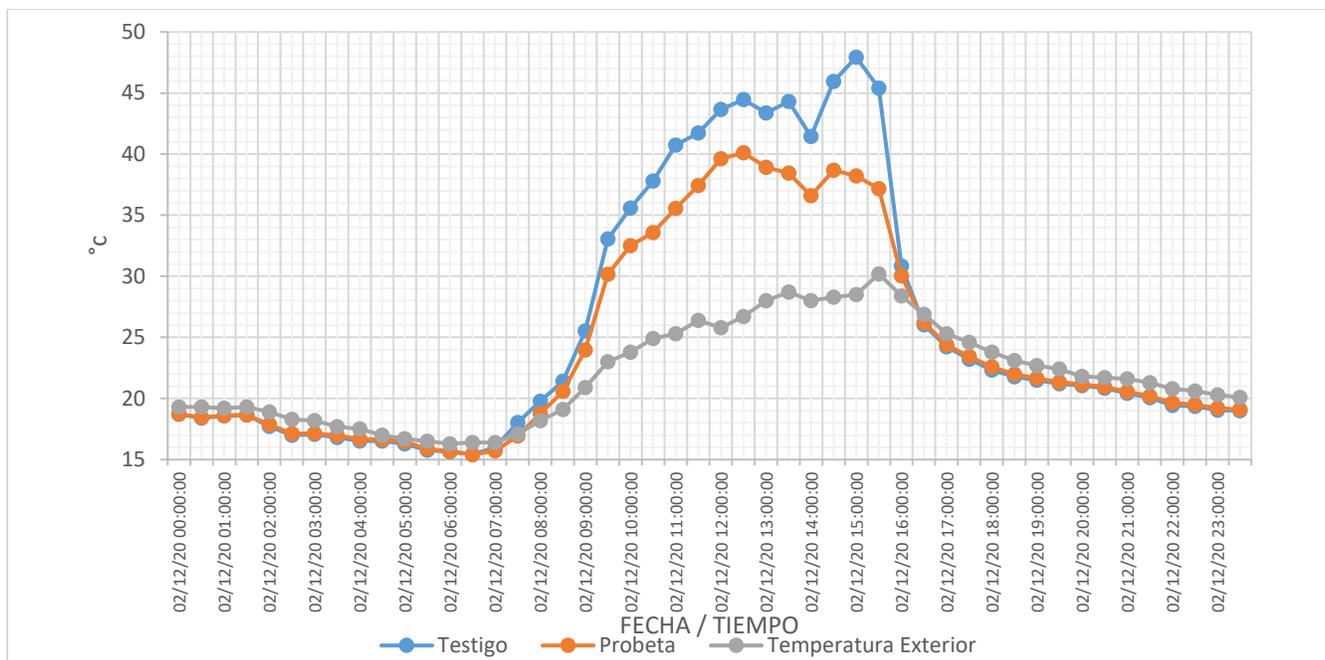


Figura 16. Comparación de resultados del experimento en el día seleccionado, el 2 de diciembre, de la semana 4. Se observa una diferencia de hasta 7.8°C entre el testigo y el módulo de prueba a las 15:00 horas, siendo el módulo con vegetación el que presenta menor temperatura.

A partir de las figuras presentadas se pueden observar las diferencias de temperatura entre ambos interiores de los días seleccionados, siendo el módulo de prueba con barrera vegetal la más beneficiada, con la disminución de temperatura del aire al interior, especialmente en las horas de mayor temperatura ambiental, entre las 12:00 y 15:00 horas.

3.2 Simulación

Con relación a la simulación, las temperaturas obtenidas al interior de la Zona Testigo fueron mayores que las de la Zona con Estrategia. En la tabla 5 se muestran las temperaturas máximas y mínimas al exterior y al interior de ambos módulos, durante el periodo total de simulación en correspondencia a la duración de la experimentación como se ha señalado anteriormente.

Tabla 5. Comparación de temperatura interior y exterior. Diferencia entre módulos imulados.

Temperatura	Tmin °C	Tprom.°C	Tmax. °C
Exterior	7.98	22.5	32
Módulo con Estrategia	7.4	26.7	47.13
Módulo Testigo	7.16	28.8	54.5

Se concluye que la diferencia entre las temperaturas ambiente exterior y los módulos se debe también a la radiación y el material simulado, lo que permitió alcanzar las temperaturas obtenidas; cabe resaltar sin embargo la aportación en la reducción de

temperatura en el módulo con la implementación de estrategia contra el testigo. Como los módulos no se encuentran con la superficie descubierta o cara abierta expuesta a los vientos dominantes, se produce un estancamiento, por lo que se deduce que las ganancias térmicas por radiación y



conducción en el poliestireno generan una convección interior.

seleccionaron los mismos días tenidos en cuenta en la etapa de la experimentación para un análisis más detallado, como se observa en la tabla 6.

A partir de los resultados de las temperaturas obtenidas en la experimentación, se

Tabla 6. Comparación de resultados de la simulación en temperaturas máximas obtenidas por semana.

		ZONA ESTRATEGIA			ZONA TESTIGO			Diferencia de temperaturas máximas
		Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media	Máxima	
SEMANA 1 10/11/2020 17/11/2020	10/11/2020	17.0729821	26.0977779	42.7110974	16.8896071	28.2299597	49.5321047	6.821007274
	11/11/2020	16.6210694	26.3411132	41.0270796	16.4774809	28.3961391	47.1933622	6.166282598
	12/11/2020	14.6478872	25.3944852	39.4348106	14.4466427	27.4421889	45.9923928	6.55758217
	13/11/2020	17.4044182	26.1805299	40.8072274	17.2283255	27.6846841	47.3425474	6.535320008
	14/11/2020	19.1886963	24.9571352	36.2908113	19.0344405	25.7795686	39.6467146	3.355903284
	15/11/2020	19.2267357	27.549929	41.9316966	19.0763994	29.3841936	48.5080282	6.576331648
	16/11/2020	17.6427613	26.8699124	43.4951379	17.5065028	28.7324985	50.2272374	6.732099459
SEMANA 2 18/11/2020 24/11/2020	17/11/2020	13.8654072	25.9902331	43.9609819	13.8098445	28.2690891	51.0062811	7.045299169
	18/11/2020	14.3498193	26.6564358	44.9594123	14.1514418	29.1599701	52.163517	7.204104742
	19/11/2020	18.0860486	27.2443635	41.136466	17.9139036	29.3242473	48.4320776	7.295611619
	20/11/2020	17.6720177	27.9269592	44.4148619	17.5249074	30.3816547	52.0698592	7.654997296
	21/11/2020	17.5250262	28.3610921	45.5790826	17.3356669	30.7845891	52.8090857	7.230003083
	22/11/2020	18.23087	28.7583778	45.3399448	18.0550436	31.1881387	52.9989818	7.659037071
	23/11/2020	18.0374772	27.0421128	41.3009489	17.8610944	28.7868665	47.6447527	6.343803724
SEMANA 3 25/11/2020 01/12/2020	24/11/2020	18.1165247	29.37328	45.7600502	17.9644731	31.8647992	52.8868754	7.126825247
	25/11/2020	18.111622	29.5726014	47.1295867	17.9344209	32.0403427	54.3176703	7.188083567
	26/11/2020	18.9920269	29.1156089	45.6418698	18.8368482	31.4967315	52.792771	7.150901161
	27/11/2020	18.9092505	28.347426	44.2242939	18.7364555	30.4537236	51.6547378	7.430443907
	28/11/2020	18.4950507	26.2361462	41.4022435	18.3683491	27.6547008	48.2277491	6.825505639
	29/11/2020	19.5517718	28.7727235	45.2890677	19.3862909	31.1002194	53.1631085	7.874040815
	30/11/2020	16.2226332	27.7692477	44.8538589	16.1320919	30.224213	52.4892541	7.635395232
SEMANA 4 02/12/2020 08/12/2020	01/12/2020	11.2107981	23.93982	43.5389008	11.0169605	26.4974811	51.5428354	8.003934585
	02/12/2020	7.36719958	19.7326884	39.9020179	7.15598255	21.6377955	47.645981	7.743963096
	03/12/2020	18.915789	28.6282006	42.56938	18.7413169	31.1629894	50.7973356	8.227955629
	04/12/2020	17.2868276	28.0237526	45.5451513	17.1094246	30.5401704	53.5499403	8.004788966
	05/12/2020	8.57582287	24.0820792	46.5405095	8.33658106	26.565221	54.4726823	7.932172786
	06/12/2020	14.5153154	28.3076955	42.3835161	14.2890839	30.6749144	50.5135237	8.130007561
	07/12/2020	16.7945199	22.6786229	37.2217932	16.6732954	23.5495482	42.9008095	5.679016304
08/12/2020	13.1991757	22.858249	39.6135267	13.0414635	25.0304211	47.8435419	8.230015153	



La diferencia en las máximas temperaturas en general entre los módulos es de 7°C (tabla 5), 5°C más en relación con la experimentación, resaltando ese promedio durante todo el periodo.

En la tabla 7 se puede observar las diferencias de temperaturas en los días seleccionados, entra la experimentación y la simulación.

Tabla 7. Comparación de la diferencia entre las temperaturas de la experimentación y la simulación.

Fecha	Experimentación	Simulación
12 Noviembre 2020	6.48°C	6.56°C
21 Noviembre 2020	6.98°C	7.23°C
24 Noviembre 2020	7.71°C	7.13°C
28 Noviembre 2020	4.5°C	6.82°C
02 Diciembre 2020	7.83°C	7.74°C

4. Conclusiones

El sistema de barrera vegetal con la especie *Cissus*, se pudo demostrar que contribuye a la disminución de temperaturas interiores, y puede ser utilizada como estrategia pasiva para mejorar el confort térmico de los espacios por sombreado vertical. Se identificó que el mayor factor que permite el mejoramiento térmico al interior, es la reducción de ganancias de radiación directa debido a la filtración por las hojas, además que bien es sabido, por las características propias de una planta, no transmite el flujo de calor que ellas reciben.

La experimentación fue uno de los elementos importantes a considerar para ver las diferencias que podían resultar de una simulación térmica con respecto a una experimentación física, considerando una superficie sombreada del 80 % en ambos casos, resultando en valores similares a favor de la disminución de las temperaturas interiores de los módulos.

En el monitoreo experimental nos permitió observar que la barrera vegetal permitió disminuir en algunos casos hasta 7.8 °C menor que el módulo testigo, y que la radiación solar directa e indirecta fue el principal factor que la barrera vegetal mitigó, evitando ganancias de calor interior de módulo con barrera vegetal, como se menciona en los comentarios de la figura 15. Por lo tanto, se concluye que en climas cálidos la implementación de barreras vegetales permite mejorar las condiciones de temperatura interior, siendo una estrategia factible para las condiciones climáticas experimentadas.

5. Agradecimientos

A la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID).

A la Facultad de Arquitectura. Universidad Autónoma de Chiapas.

Al Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables, sede Tuxtla Gutiérrez.



6. Agradecimiento de autoría

Carmina Elizabeth Dominguez Cicorio: Conceptualización; Ideas; Metodología; Recursos; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Borrador original; Escritura; Revisión y edición; Administración de proyecto.
Luis Aarón García Solórzano: Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Análisis de datos; Revisión y edición.
Raúl Pavel Ruíz Torres: Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Recursos; Escritura; Revisión y edición; Administración de proyecto; Supervisión.

Referencias

- [1] R. Sola Nadal, “*Acciones locales frente a los retos del cambio climático en España: Objetivos globales, soluciones locales*”, Publicacions Universitat Rovira I Virgili, 2019. <https://doi.org/10.17345/9788484247821>
- [2] L. A. Vargas Robles “Percepción del ambiente térmico en espacios de transición de clima cálido seco”, Tesis doctoral, Universidad de Colima, Facultad de arquitectura y diseño, 2016.
- [3] L. Peña Barrera, “*Diseño Bioclimático*”, Primera edición, Ciudad Juárez, Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2015.
- [4] S. Hernández, “*La sustentabilidad en la enseñanza de la arquitectura en México*”, México, Revista La Colmena, [S.l.], n. 59, p. 107-113, oct. 2017. ISSN 2448-6302. Disponible en: <https://lacolmena.uaemex.mx/article/view/5989>.
- [5] M. E. Sosa y G. Siem, “*Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico*”, Ediciones FAU UCV, Caracas, Venezuela, 2012.
- [6] E. T. Haro Carbajal, “Comportamiento de dos tipos de cubiertas vegetales, como dispositivos de climatización, para climas cálidos sub-húmedos,” Tesis de maestría, Universidad de Colima, Facultad de arquitectura y diseño, 2009.
- [7] E. F. Villegas Gutiérrez, “*Estudio experimental con dispositivos de sobrecubierta como estrategia de control solar para un clima cálido sub-húmedo*,” Colima, Universidad de Colima, 2015.
- [8] L. Fajardo, “*Desempeño costo – beneficio de dos sistemas pasivos de climatización en cubiertas para climas cálidos – sub húmedo*,” Caso Coquimatlán, Colima. Tesis para obtener el grado de Maestro en Arquitectura. Colima, México, 2005.
- [9] A. Beltrán-Melgarejo, M. Vargas-Mendoza, A. Pérez-Vázquez y J. García-Albarado, “*Confort térmico de techos verdes con Cissus verticillata (Vitaceae) en viviendas rurales tropicales*,” Revista mexicana de ciencias agrícolas, 5(spe9), 1551-1560. <https://dx.doi.org/10.29312/remexca.v0i9.1047>, 2014.
- [10] J. Cárdenas, G. Osma y G. Ordóñez “*Herramienta metodológica para la evaluación energética mediante simulación de edificaciones en el trópico*,” Rev. UIS Ing., vol. 18, no. 2, pp. 259-268, 2019. doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019024>.
- [11] E. Orlando y L. Berkeley, “EnergyPlus Testing with ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST),” *Environ. Res.*, vol. 2001, no. May, 2003.
- [12] J. M. Casas Arredondo, “*Simulación térmica de edificaciones con Energy Plus y Ener-Hábitat: Análisis de la interacción entre los componentes de la envolvente*,” Tesis para optar por el grado de Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, 2014.
- [13] A. Flores Condori, “*Simulación del desempeño térmico en viviendas altoandinas sostenibles con climatización pasiva en la*



provincia de El Collao,” Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Escuela de Posgrado, Puno, Perú, 2018.

[14] V. A. Fuentes Freixanet, “*Mapas bioclimáticos de la República Mexicana,*” Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco. División de Ciencias y Artes para el Diseño. México D.F., 2014.

[15] E.M. González Cruz, “*Selección de materiales en la concepción arquitectónica*

bioclimática,” Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD) Universidad del Zulia 4011-A-526 Maracaibo, Venezuela.

[16] (CONAVI) Comisión Nacional de Vivienda. “*Código de Edificación de Vivienda,*” 3ra. Edición, 2017.



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](#)



Análisis numérico del contacto entre cadena con elementos de plástico y catarina de metal utilizando modelos hiperelásticos

Numerical analysis of contact between chain with plastic elements and metal catarine using hyperelastic models

Miguel Alberto Domínguez Gurría ¹, Dariusz Szwedowicz ¹, Ulises Augusto Jaén Rendon ¹, Eladio Martínez Rayón ¹, Angelo Garibaldi Rodríguez ²

¹Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira, CP. 62490, Cuernavaca, Morelos, México

²CETYS Universidad Campus Tijuana, Calz Cetys 813, C.P. 22210, Lago Sur, Tijuana, Baja California

Autor de correspondencia: Miguel Alberto Domínguez Gurría, Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira, CP. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. E-mail: migueldominguez16m@cenidet.edu.mx. ORCID: 0000-0001-5368-9815.

Recibido: 14 de Agosto del 2021 **Aceptado:** 22 de Diciembre del 2021 **Publicado:** 12 de Enero del 2022

Resumen. - *En este trabajo se presenta un análisis numérico del acoplamiento entre una catarina motriz y una cadena con elementos de plástico en la transmisión de potencia. El estudio se realiza mediante análisis numérico con software de elementos finitos. El sistema considera los modelos reológicos para la caracterización del material plástico de la cadena. Con base al presente estudio se confirmó la utilidad del modelo de Marlow para casos de cadenas con elementos plásticos. Los resultados muestran las zonas de mayor concentración de esfuerzo debido al contacto entre elementos para la transmisión de potencia y definir la variación de la fuerza de contacto en función de la rotación de la catarina motriz.*

Key words: Elemento finito; Modelos hiperelásticos; Cadena de plástico; Esfuerzos de contacto.

Abstract. - *In this work a numerical analysis of the coupling between a motor sprocket and a chain with plastic elements in the power transmission is presented. The study is carried out through numerical analysis with finite element software. The system considers the rheological models for the characterization of the plastic material of the chain. Based on the present study, the usefulness of the Marlow model for cases of chains with plastic elements was confirmed. The results show the areas of greatest stress concentration due to the contact between elements for the transmission of power and define the variation of the contact force as a function of the rotation of the sprocket.*

Keywords: Finite element; Hyperelastic models; Plastic chain; Stress contact.



1. Introduction

Una de las tareas más importantes en el diseño de máquinas es la transmisión de potencia, que en la gran mayoría de los casos se realizan a través de elementos rotantes, ya que la transmisión de energía por rotación ocupa mucho menos espacio que aquella por traslación.

Diversos factores son considerados para elegir la manera o método de transmisión de potencia a utilizar, como lo son la relación de velocidades, limitaciones geométricas, higiene, vibraciones externas, entre otras. En ingeniería se pueden mencionar tres tipos principales de métodos de transmisiones de potencia: engranes, bandas y cadenas [1].

Las transmisiones de potencia mediante cadenas se caracterizan principalmente por operar en presencia de humedad y altas temperaturas, así mismo, por tener una relación constante de velocidades y capacidad para impulsar varios ejes.

Existen diferentes tipos de cadenas, particularmente, las cadenas de rodillos son las más utilizadas debido a las ventajas que presentan sobre las demás configuraciones, como tener un menor costo, además de poder colocarlas a grandes distancias entre ejes y presentar una excelente relación entre la carga y la velocidad.

Las cadenas elaboradas con material metálico son mayormente utilizadas con respecto a las fabricadas con material plástico. Sin embargo, existen diversos sectores industriales en los cuales se aprovechan las características de las cadenas de plástico, como son el farmacéutico, textil y alimenticio.

Una de las principales ventajas del uso de las cadenas de plástico es que estas no requieren lubricación a diferencia de las metálicas, y también presentan mayor resistencia a la corrosión.

En la Figura 1 se muestra la diferencia de la elongación consecuente al desgaste con respecto al tiempo de operación para una cadena de acero lubricada y no lubricada, además de, una cadena con elementos de plástico.

Para una cadena con elementos de plástico, el desgaste se presenta de manera más lenta, con respecto a una cadena convencional de acero.

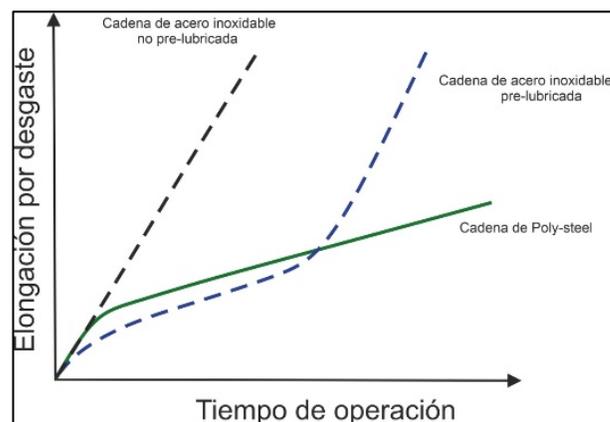


Figura 1. Comparativa entre cadena de plástico y de acero. [3]

La vida útil y el desempeño de las cadenas se ve afectado o comprometido debido a problemas como la deformación, fatiga, desgaste, vibración entre otros factores. Las fuerzas de impacto generadas por el acoplamiento entre los elementos de la cadena y la catarina motriz, son las responsables de gran parte de los problemas mencionados.

Las investigaciones realizadas sobre las cadenas de transmisión se enfocan en diferentes áreas de estudio, como son: distribución de fuerzas, impacto, ruido, vibración y fallas [4].

Para identificar las partes críticas y las zonas menos susceptibles a fallas, es necesario conocer la distribución de los esfuerzos en los componentes de las transmisiones, para así



lograr prevenir mediante rediseño dichas fallas, por ello, se han realizado modelos teóricos para obtener la distribución de carga en las cadenas y en los dientes de la rueda dentada, incluyendo las rigideces de los eslabones de la cadena y de los dientes de la rueda dentada en el modelo matemático [5].

Con la finalidad de obtener una mayor aproximación de la distribución de carga en las ruedas dentadas, se incluye la influencia de la fricción existente entre los elementos de contacto. Esto mediante la reducción del ángulo de presión, el cual debe ser determinado experimentalmente. Las ecuaciones que determinan la distribución consideran que el sistema se encuentra en un estado estacionario [6]. La inclusión del fenómeno de fricción en los análisis de distribución de fuerzas demuestra que ésta provoca una mayor carga en un diente de la rueda dentada impulsada en comparación al de la rueda dentada motriz considerando un mismo número de dientes. Estudios experimentales se han realizado con la finalidad de medir la distribución de cargas en las cadenas de rodillos de acero sobre ruedas dentadas de acero, esto incluyendo el efecto que tiene la lubricación, desalineamiento y la velocidad de rotación en la rueda dentada [7]. Troedsson [8] modeló una transmisión de cadena, mostrando que los modelos anteriores al suyo no presentan resultados suficientes para una transmisión que actúa a velocidades más altas.

Los plásticos de ingeniería juegan un papel cada vez más importante como sustitutos de los metales convencionales debido a sus propiedades mecánicas, resistencia química, excelente maquinabilidad y estabilidad dimensional [9]. Sin embargo, se han realizado pocas investigaciones en el área de determinación de distribuciones de cargas con elementos de plástico, incluso los manuales para la selección de cadenas no contemplan este tipo de material. Éste menciona que, para seleccionarlas, deben considerarse

presiones entre el casquillo y perno [10], por lo que estudiar este fenómeno dará pautas para determinar zonas críticas y establecer recomendaciones para prevenir posibles fallas.

En este artículo se analiza el comportamiento dinámico de la transmisión de potencia con una cadena de plástico mediante el método de los elementos finitos, verificando la factibilidad del uso de modelos reológicos para este tipo de análisis. Se determinan los esfuerzos máximos y las zonas críticas a fallas ocasionados por el contacto en el acoplamiento con la rueda dentada.

1.1 Marco teórico

En una transmisión de potencia mediante cadenas de acero, la fuerza se transmite a través del contacto entre el barril de la cadena o rodillo y la cara de trabajo del diente en la rueda dentada. Estas fuerzas se muestran en la Figura 2. La cara del diente está en ángulo con la línea de paso de la cadena. Por lo tanto, cuando se aplica la tensión de la cadena, T , resultan dos fuerzas. Una es la fuerza del diente, T_c , que es normal a la cara de trabajo. La otra fuerza, T_p , es de expulsión del rodillo y es paralela a la cara del diente.

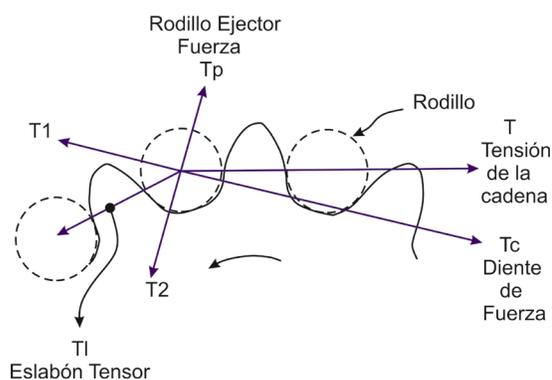


Figura 2. Fuerzas en un diente de la rueda dentada a medida que se aplica la tensión de la cadena [2].



Binder [4] presenta el análisis de distribución de carga de progresión geométrica para determinar la tensión en los eslabones de la cadena de rodillos, por lo cual, define el ángulo de presión media ϕ y el ángulo de articulación α para una cadena nueva mediante las siguientes relaciones:

$$\phi = 35^\circ - 120^\circ/N; \quad (1)$$

$$\alpha = 360^\circ/N; \quad (2)$$

Donde N es el número de dientes en la rueda dentada que engrana con la cadena en una revolución completa.

La Figura 3 muestra las fuerzas entre los rodillos de la cadena y los dientes de la rueda dentada y define la tensión en los eslabones de la cadena y presenta los diagramas de cuerpo libre para dos rodillos de la cadena.

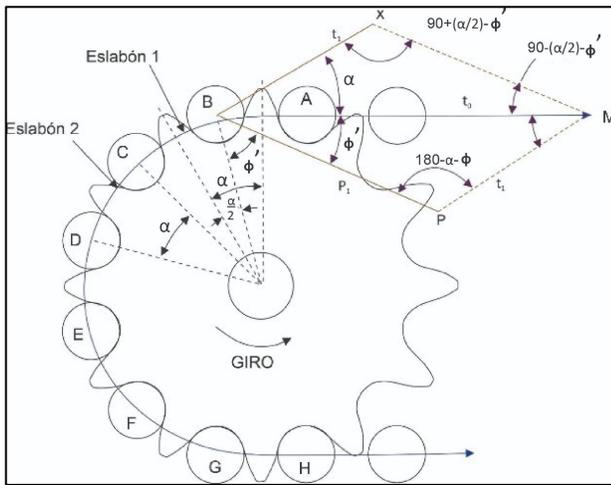


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre [4].

A partir del diagrama de cuerpo libre, se define la siguiente relación:

$$t_n = t_0 \left(\frac{\sin \phi}{\sin \alpha + \phi} \right)^n \quad (3)$$

La ecuación 3 proporciona la fuerza de tracción (t_n) en el n -ésimo eslabón de la cadena en función de la carga del lado tenso (t_0) y la geometría de la rueda dentada y es independiente de las propiedades del material.

La forma de diente estándar está diseñada para distribuir una parte de la fuerza de tensión a todos los dientes enganchados con rodillos de cadena [2]. La fuerza que soporta cada diente se puede encontrar usando las siguientes ecuaciones:

$$P_n = t_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \phi} \right)^{n-1} \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \phi} \right) \quad (4)$$

Alrededor del 31% de la carga es tomada por el primer diente, 22% por el segundo, 16% por el tercero, 12% por el cuarto, 8% por el quinto, 6% por el sexto, 4% por el séptimo diente y 1% el último diente en contacto [2].

2. Metodología

Es necesario analizar el comportamiento de los elementos que constituyen la cadena y la influencia del material plástico y su no linealidad, rango de operación, así como determinar la fuerza máxima de ruptura bajo cargas de tensión.

El comportamiento a tensión del conjunto es punto comparativo para el posterior análisis numérico. La Figura 4 muestra la metodología empleada en el desarrollo de la investigación.

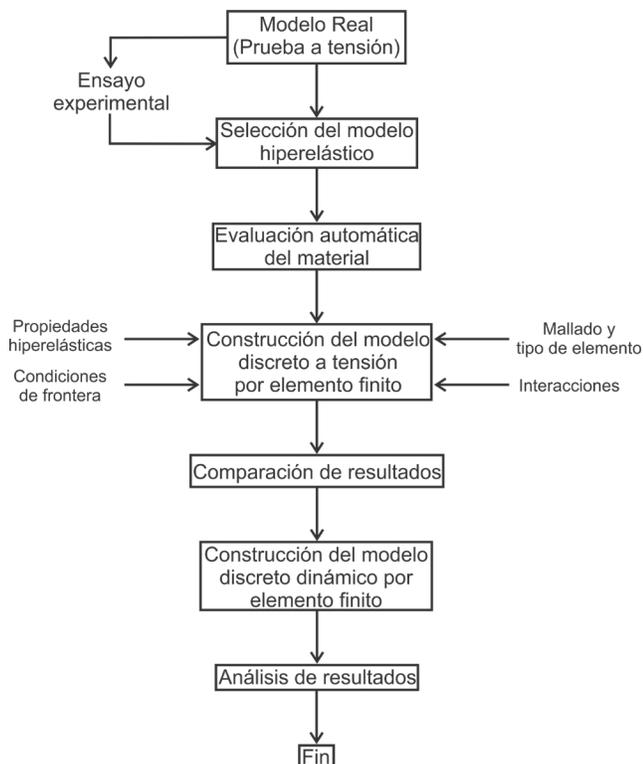


Figura 4. Metodología para el desarrollo de la investigación.

2.1 Pruebas experimentales

Para el análisis del problema de contacto se escogió una cadena con elementos de plástico marca Tsubaki™ en su serie PC de paso 40 (12.7 mm de paso) [10]. La cadena consta de tres elementos diferentes; un perno de acero (1), una placa externa de acero (2) y un elemento interno (3) de material plástico [11]. En la Figura 5 se muestran los elementos que forman la cadena.

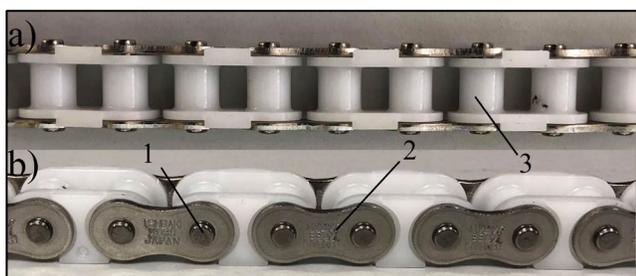


Figura 5. Elementos que conforman la cadena, donde: a) vista superior de la cadena, b) vista frontal de la cadena.

La metodología usada en el desarrollo de la experimentación consistió en la caracterización del elemento de material plástico mediante pruebas de tensión a rotura. Esto con la finalidad de observar el comportamiento de los materiales de la cadena como conjunto y obtener la curva esfuerzo-deformación, la influencia del material plástico, así como determinar la fuerza máxima de rotura y zona de falla en el elemento de plástico de la cadena. Se realizaron pruebas experimentales en una máquina de ensayos universal Shimadzu AGX plus 100 kN, 5 kN, con una precisión de tensión de $\pm 1\%$, con una precisión de $1/48 \mu\text{m}$ y una velocidad de 0.0005 a 10000 mm/min.

Para tener una sujeción adecuada entre la cadena y las mordazas de la máquina de ensayos universal y evitar el efecto del momento flexionante generado en el perno de la cadena, se fabricó un par de placas externas de acero. El montaje de los elementos de la cadena en las mordazas utilizando las placas de sujeción se presenta en la Figura 6.

La prueba experimental consistió en definir una fuerza de tensión a la cadena. La prueba se realizó a una velocidad constante de 5 mm/min [26] y finalizó instantes después que el elemento de la cadena presentara rotura. Posteriormente, bajo las mismas condiciones se realizaron pruebas de rotura con un elemento de plásticos formando la cadena.

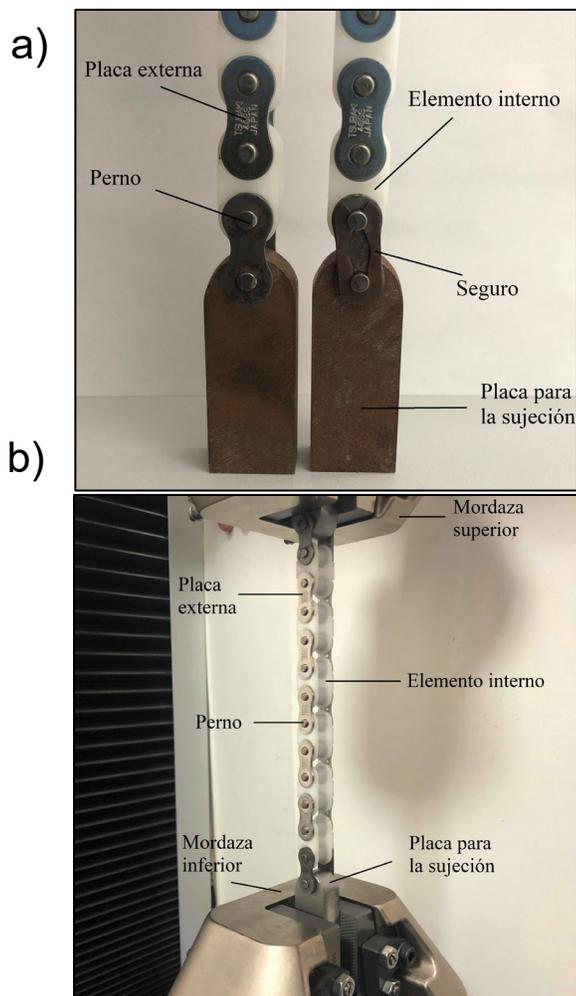


Figura 6. Componentes de la cadena, donde a) utilización de placas de sujeción, b) montaje de la cadena en máquina universal de ensayos.

2.2 Procedimiento numérico

La teoría del contacto Hertziano presenta limitantes con respecto al fenómeno de impacto, fricción y la no linealidad del material [12]. Esta teoría no es apropiada para una solución aproximada del problema, razón por la cual se realiza un análisis con el método de los elementos finitos (MEF) para este tipo de problemas.

MEF es utilizado en los casos en los que se imposibilita la aplicación de técnicas analíticas. Consiste en la resolución de ecuaciones

diferenciales que modelan el problema mediante procedimientos numéricos iterativos [13].

La metodología usada en el desarrollo de la experimentación numérica consiste en establecer la geometría de los elementos que integran la cadena de plástico. A partir de la geometría se establece su discretización geométrica. Se definen las propiedades del material.

Para la caracterización del comportamiento elástico no lineal, considerando que Trobentar [14], utilizó el modelo hiperelástico de Marlow para representar dicha no linealidad, se realizaron simulaciones numéricas. La metodología que se empleó se encuentra dividida en tres etapas:

1. *Análisis del modelo real e identificación de condiciones de frontera.*
2. *Selección del modelo reológico y evaluación automática del material.*
3. *Realización del modelo discreto y posteriormente validación de datos experimentales.*

Se estableció un modelo numérico para condiciones cuasi-estáticas que representara la prueba experimental a tensión. El modelo incluyó dos pernos de acero, cuatro mitades de la placa externa de acero y un elemento interno de plástico.

La Figura 7 presenta el modelo discretizado con sus respectivos elementos, los cuales son: un par de pernos de acero, el elemento interno de plástico y secciones de las placas externas de acero. Las condiciones de frontera del modelo discreto fueron un desplazamiento correspondiente a la prueba cuasi-estática como punto comparativo, el cual fue definido en las placas de acero superiores, las placas de acero inferiores del modelo discreto fueron



restringidas a cualquier tipo de movimiento en los tres ejes coordenados.

Las condiciones de contacto establecidas en el modelo fueron: Perno- elemento interno de plástico, placa externa – elemento interno de plástico y perno – placa externa. Para todas las condiciones de contacto se utilizó el algoritmo “penalty”, debido a que es el adecuado para contactos con elementos rígidos [25].

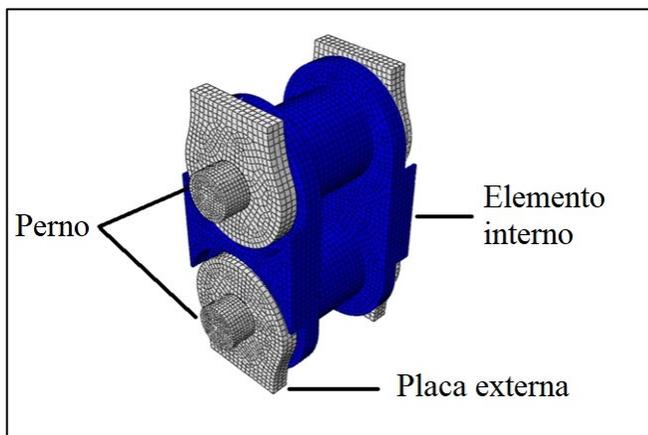


Figura 7. Modelo cuasi-estático discretizado.

Las propiedades de los materiales que constituyen los componentes de la cadena se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Propiedades de los materiales que constituyen los elementos de la cadena [20], [21].

	Poliacetal	Acero 304
Densidad [kg/m^3]	1450	8000
Módulo de Young [MPa]	2900	193000
Resistencia a la fluencia [MPa]	70	300
Razón de Poisson	0.35	0.29

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de fricción utilizados para las condiciones de contacto en el modelado numérico.

Tabla 2.- Coeficientes de fricción para elementos en contacto [22]

	Coefficiente de fricción estático	Coefficiente de fricción dinámico
Acero – acero	0.35	0.15
Acero - poliacetal	0.25	0.01

Las condiciones máximas de operación recomendadas por el fabricante para el modelo de cadena analizada se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Condiciones máximas de operación recomendadas por el fabricante [23].

Cadena PC 40	
Velocidad máxima [m/min]	70
Tensión [N]	440

Se realizó un modelo discreto utilizando el software Abaqus/Explicit el cual se validó mediante las ecuaciones de carga en los dientes de la rueda dentada y contacto Hertziano.

El modelo discreto se muestra en la Figura 8, consiste en una sección de la rueda dentada con 5 dientes (1), elementos ensamblados de la cadena de rodillos, los cuales se definen como, externo (2), perno (3) y rodillo (4).

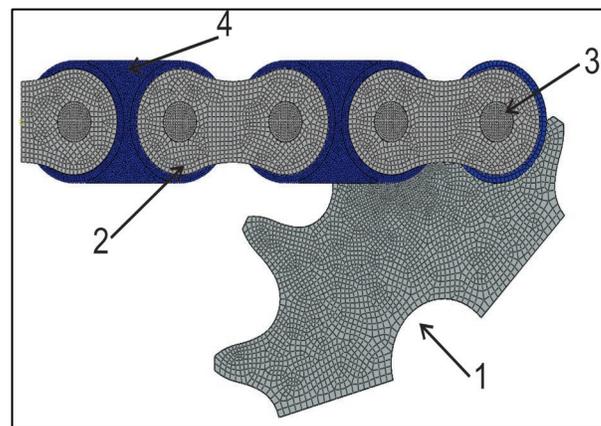


Figura 8. Mallado del modelo dinámico

Los elementos deformables utilizados en el modelado son de tipo C3D8R, de igual manera,



se utilizaron elementos rígidos de tipo R3D4 en la rueda dentada y en las placas externas, con la única finalidad de reducir el tiempo de cómputo.

Los elementos de plástico en la cadena de transmisión se consideraron de material poliacetal [3]. El poliacetal presenta un comportamiento elástico no lineal, por lo tanto, se definió el modelo hiperelástico de Marlow para el material plástico [15].

Las condiciones de frontera del modelo discreto se muestran en la Figura 9, en ella se considera la fuerza de tensión máxima sugerida por el fabricante [3]. La velocidad de rotación en el sistema se aplica mediante un punto de referencia en el centro de la rueda dentada.

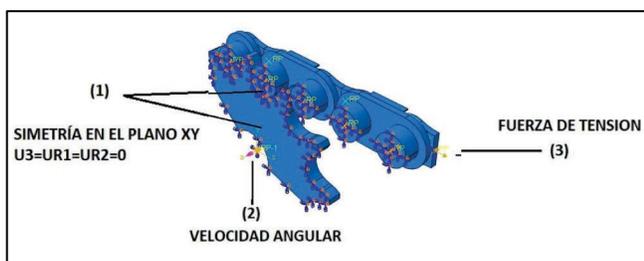


Figura 9. Condiciones de frontera del modelo discreto.

En la zona de contacto a analizar se utilizó una malla más fina de acuerdo a Liu [16], que menciona que la densidad de malla solo requiere ser fina en las áreas de importancia, quedando 0.2 mm de tamaño de elementos para la zona de contacto, 0.5 mm para el eslabón externo, 0.5 mm para el eslabón interno (rodillo) y 0.7 mm para la catarina, con un total de 81541 elementos y 100573 nodos en el modelo.

3. Resultados

De acuerdo con la prueba experimental de tensión en los elementos de la cadena se obtuvo una aproximación del comportamiento del material plástico, debido a que es una estructura compuesta,

de igual manera la fuerza máxima del elemento al presentar falla.

Debido a que el poliacetal tiene un comportamiento elástico no lineal y considerando que Boštjan [24] utilizó el modelo hiperelástico de Marlow para simular dicho comportamiento, se realizó una evaluación del material mediante análisis numérico con la finalidad de aproximar. El análisis abarcó diferentes modelos reológicos con los cuales cuenta la paquetería del software de MEF. Los modelos analizados fueron: polinomial, Marlow[17] y Ogden[18].

La Figura 10 presenta la comparación entre los diferentes modelos reológicos y los datos obtenidos de las pruebas experimentales a tensión con la cadena de plástico.

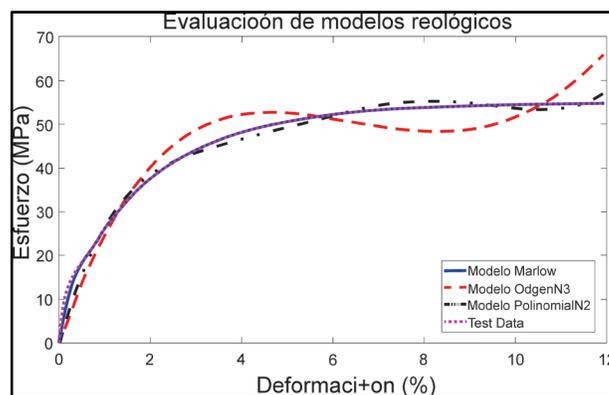


Figura 10. Comparación de modelos reológicos [23].

El análisis numérico de los diferentes modelos hiperelásticos concluyó con una mayor aproximación entre el modelo de Marlow respecto a la prueba experimental cuasi-estática. La Figura 11 muestra la comparación de la gráfica obtenida experimental y numéricamente con el modelo cuasi-estático.

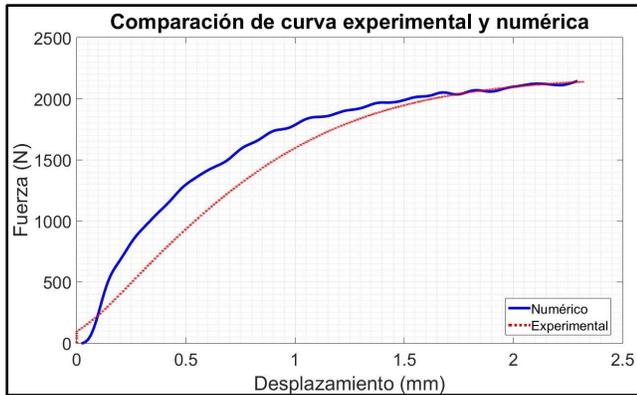


Figura 11.- Gráfica comparativa entre resultado numérico y experimental [19].

El acoplamiento generado a causa de la rotación de la catarina motriz es representado en el modelo dinámico. Ante el primer contacto causado por dicho acoplamiento entre el elemento de plástico y el diente de la catarina motriz se genera una distribución de esfuerzos como se presenta en la Figura 12.

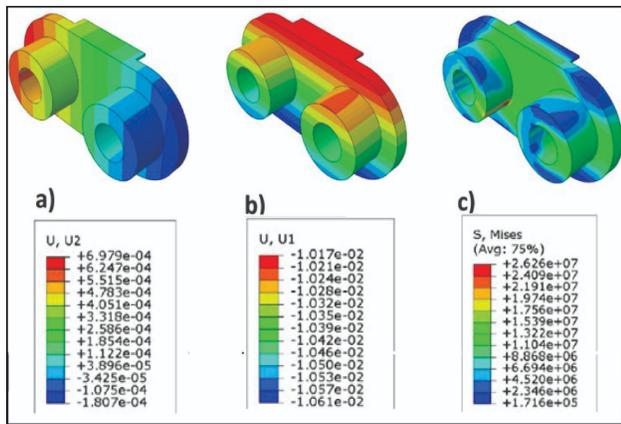


Figura 12. Resultados numéricos, donde: a) esfuerzos de Von Mises, b) desplazamientos en x, c) desplazamientos en y.

El elemento de plástico en el instante del acoplamiento presenta un esfuerzo máximo de 26.14 MPa en la zona de contacto con el diente de la catarina motriz. En el instante del acoplamiento entre el rodillo del elemento de plástico y el diente de la catarina motriz, se genera una fuerza normal

entre ellos. Esta fuerza varía en función de la posición angular dada por la rotación de la catarina. La Figura 13 presenta la variación de la fuerza normal de contacto de los primeros dos rodillos del elemento de plástico con respecto a la rotación de la catarina.

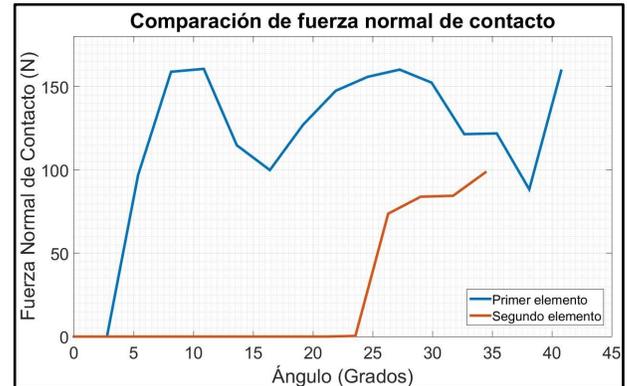


Figura 13. Fuerza normal de contacto para el primer y segundo rodillo.

La fuerza normal aumenta y disminuye según la posición angular que presenta la catarina motriz al giro sin perder el contacto entre el rodillo del elemento de plástico y el diente de la catarina motriz.

En el instante del primer contacto producido entre elementos se genera una fuerza de 160 N. Con lo que respecta al segundo elemento en entrar en contacto, se genera una fuerza de 80 N al acoplarse.

La Figura 14 muestra un ejemplo escogido de los esfuerzos de contacto generados en el rodillo del elemento de plástico en el instante del acoplamiento con el diente de la catarina motriz.

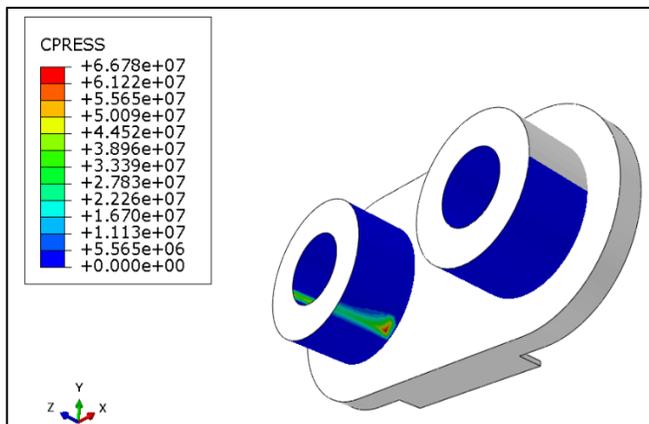


Figura 14. Presión de contacto en el rodillo del elemento de plástico (expresada en Pascales).

El mayor esfuerzo de contacto en el rodillo del elemento de plástico se presenta en la zona de acoplamiento con el diente de la catarina motriz. Se presenta con un valor de 66.7 MPa.

La disminución en la fuerza en función de la rotación la describe la American Chain Association [2] y menciona que para una rueda dentada de 15 dientes el primero toma el 31% de esa carga. Para el caso de estudio, con una rueda dentada de 12 dientes y mediante la ecuación (4) se obtuvo que el primer diente absorbería el 38% de la carga, lo cual representa una fuerza teórica de 134.28 N, no obstante, los resultados numéricos muestran que el primer diente toma el 27% de la fuerza, con una diferencia del 16%, lo anterior se atribuye a la deformación del eslabón plástico de la cadena, lo que no se considera en la teoría.

4. Conclusiones

Se determinó un modelo discreto que permite modelar el acoplamiento de la cadena y la rueda dentada en condiciones dinámicas. Se corroboró el modelo discreto desarrollado en el software Abaqus/Explicit; se obtuvo una validación con una diferencia menor al 16% con respecto a los resultados analíticos. Se confirmó la utilidad del modelo hiperelástico de Marlow para simular el

comportamiento no lineal del poliacetal. La cadena con elementos de plástico sometida a tensión fallará en el elemento de plástico, esto debido a la menor rigidez dada por el material. Se obtuvo experimentalmente el valor de la fuerza de rotura para esta cadena, el cual fue de 2050 N, es decir, 5 veces mayor de la información del fabricante de la cadena. Se determinaron las zonas de mayor concentración de esfuerzo en la transmisión de cadena con elementos de plástico, las cuales se presentan en donde el acoplamiento se produce. El modelo dinámico permitió confirmar que el primer diente de la catarina motriz absorbería el 27% de la fuerza, esto representa una mayor fuerza en el contacto con respecto al diente siguiente.

5. Agradecimiento de autoría

Miguel Alberto Domínguez Gurría: Conceptualización, Metodología, Validación, Investigación, Escritura - Borrador original, Escritura: revisión y edición, Visualización.
Dariusz Szwedowicz: Supervisión, Conceptualización, Metodología, Escritura: revisión y edición, Recursos.
Ulises Augusto Jaén Rendón: Investigación, Visualización.
Eladio Martínez Rayón: Supervisión, Análisis formal, Escritura: revisión y edición.
Angelo Garibaldi Rodríguez: Metodología, Investigación, Visualización.

Referencias

- [1] R. A. Calero and J. A. Carta, "Mecanismos de cadenas," in *Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros*, McGraw-Hill, Ed. 1998, pp. 269-287.



[2] American Chain Association, "Chains for Power Transmission and Material Handling," in Standard Handbook of Chains, Second Edi., Tsubakimoto Chain Co., Ed. 2006, pp. 267-280.

[3] TSUBAKI POWER TRANSMISSION [online], 2020, disponible, <https://chains.ustsubaki.com/viewitems/anti-corrosive-heat-resistant-chains/poly-steel-chains-2>

[4] R. C. Binder, Mechanics of the roller chain drive. Prentice-Hall, 1956.

[5] K. M. Marshek, "On the analyses of sprocket load distribution," Mech. Mach. Theory, vol. 14, no. 2, pp. 135-139, 1979. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(79\)90028-4](https://doi.org/10.1016/0094-114X(79)90028-4)

[6] M. R. Naji and K. M. Marshek, "Analysis of sprocket load distribution," Mech. Mach. Theory, vol. 18, no. 5, pp. 349-356, 1983. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(83\)90130-1](https://doi.org/10.1016/0094-114X(83)90130-1)

[7] M. R. Naji and K. M. Marshek, The effects of the pitch difference on the load distribution of a roller chain drive, vol. 24, no. 5. 1989. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(89\)90065-7](https://doi.org/10.1016/0094-114X(89)90065-7)

[8] I. Troedsson and L. Vedmar, "A method to determine the dynamic load distribution in a chain drive," J. Mech. Eng. Sci., vol. 215, pp. 569-579, 2001. <https://doi.org/10.1243/0954406011520959>

[9] B. H. Eldiwany and K. M. Marshek, "Experimental load distributions for double pitch steel roller chains on polymer sprockets," Mech. Mach. Theory, vol. 24, no. 5, pp. 335-349, 1989. [https://doi.org/10.1016/0094-114X\(89\)90064-5](https://doi.org/10.1016/0094-114X(89)90064-5)

[10] U. S. Tsubaki, The Complete Guide to Chain. Wheeling, Illinois: Sachio Shimura, 1997.

[11] T. C. Co, "Tsubaki drive chains & sprockets." .

[12] K. L. Johnson, "Contact mechanics," C. U. Press, Ed. 1985, pp. 84-104. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>

[13] M. E. Ródenas, E. Universitaria, and D. E. Empresariales, "Análisis por elementos finitos: una metodología muy reciente en n economía," pp. 1-11.

[14] B. Trobentar and S. Glodež, "Deflection Analysis of Spur Polymer Gear Teeth," J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol., vol. 2, no. 4, pp. 847-853, 2015.

[15] B. Trobentar, S. Glodež, and B. Zafošnik, "Deflection Analysis of Spur Polymer Gear Teeth," J. Multidiscip. Eng. Sci. Technol., vol. 2, no. 4, pp. 847-853, 2015.

[16] G. Liu and S. Quek, The Finite Element Method: A Practical Course. Butterworth-Heinemann, 2003.

[17] R. Tobajas, D. Elduque, C. Javierre, E. Ibarz, and L. Gracia, "A comparative study of hiperelastic constitutive models or an



automotive component material," no. c, pp. 338-347, 2016.

[18] A. E. Ehret, "On a molecular statistical basis for Ogden 's model of rubber elasticity," J. Mech. Phys. Solids, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.02.006>

[19] M. A. Domínguez, "Estudio numérico de la influencia de la rigidez de contacto de los elementos de transmisión de potencia en una cadena en caso de impacto," Tesis de maestría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2018.

[20] Dupont, "Product information: DuPont™ Engineering Polymers Delrin Delrin ® 100 NC010." pp. 1-9, 2014.

[21] U. S. Tsubaki, "The Complete Guide to Chain," Tsubaki., M. Kanehira, Ed. 1997, pp. 85-115.

[22] S. Anders, "Polycarbonates polyacetals polyesters cellulose esters," Hanser Ver. 1996.

[23] Tsubaki, The Complete Guide to Chain. Illinois: Sachio Shimura, 1997.

[24] Trobentar, B. and S ". Glodež, 2015, Deflection analysis of spur polymer gear teeth",_ Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology, vol. 2, no. 4, pp. 847-853.

[25] T. Bhoite, P. Pawar, and B. Gaikwad, "FEA based study of effect of radial variation of outer link in a typical roller chain link assembly," Int. J. Mech. Ind. Eng., vol. 1, pp. 65-70, 2012. <https://doi.org/10.47893/IJMIE.2012.1070>

[26] ASTM D638-02a "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics"



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](#)



Statistical influence of NH_4OH , number of layers and droplet volume in the development of ultra-hydrophobic coatings based on SiO_2 nanoparticles

Influencia estadística del NH_4OH , número de capas y volumen de gota en el desarrollo de recubrimientos ultra-hidrofóbicos basados en nanopartículas de SiO_2

Jose Felix Magdaleon Loredo , Delfino Cornejo Monroy 

Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Del Charro 450 Norte, Col. Partido Romero 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Corresponding author: Jose Felix Magdaleon Loredo, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Av. Del Charro 450 Norte, Col. Partido Romero 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. E-mail: al198636@alumnos.uacj.mx. ORCID: 0000-0002-2043-2842

Recibido: 18 de Septiembre del 2021 **Aceptado:** 22 de Diciembre del 2021 **Publicado:** 13 de Enero del 2022

Abstract. – *Ultra-hydrophobic coatings are of interest in automotive, aeronautical and construction applications and in general in any area or surface where the use of highly water-repellent surfaces, with self-cleaning, anti-icing, and anti-corrosion properties is favorable. In recent years, various researchers have proposed different physical and chemical methods to obtain high-hydrophobic condition. In this article, the manufacture of a colloid based on SiO_2 nanoparticles is described to manufacture hydrophobic coatings with contact angles greater than 140° . With the help of a design of experiments and the manufacture of a colloid based on SiO_2 by the colloidal method, three factors were analyzed with their corresponding levels and their influence to maximize the contact angle. The fabricated colloid was sprayed and layered onto glass. In all the materials where the coating was applied, static contact angles (SCA) between 120° and 160° were obtained. Results by UV-Vis's spectroscopy indicate that the transparency is greater than 68% and that this depends directly on the layers applied by spraying and on the quality of the film formed. The FT-IR spectra support the formation of SiO_2 nanoparticles, the presence of -OH groups in the different stages of the colloid manufacturing process, and C-F bonds. The composition and morphology were analyzed by field emission scanning electron microscopy (FESEM). FESEM micrographs were analyzed for the ultra-hydrophobic solutions and showed agglomeration of nanoparticles. As work in the future, it is proposed to analyze the wear resistance of coatings, their durability, and sliding angle, improving their hydrophobic properties.*

Keywords: Ultra-hydrophobic coatings; Design of experiment; SiO_2 nanoparticles; Sol-gel method; Transparency.

Resumen. – *Los recubrimientos ultra-hidrofóbicos son de interés en aplicaciones de automoción, aeronáutica y construcción y en general en cualquier zona o superficie donde sea favorable el uso de superficies altamente hidrofugantes, con propiedades autolimpiantes, antihielo y anticorrosión. En los últimos años, varios investigadores han propuesto diferentes métodos físicos y químicos para obtener una condición altamente hidrofóbica. En este artículo se describe la fabricación de un coloide a base de nanopartículas de SiO_2 para fabricar recubrimientos hidrofóbicos con ángulos de contacto superiores a 140° . Con la ayuda de un diseño de experimentos y la fabricación de un coloide a base de SiO_2 por el método coloidal, se analizaron tres factores con sus correspondientes niveles y su influencia para maximizar el ángulo de contacto. El coloide fabricado se pulverizó y se colocó en capas sobre el vidrio. En todos los materiales donde se aplicó el recubrimiento se obtuvieron ángulos de contacto estático (SCA) entre 120° y 160° . Los resultados por espectroscopía UV-Vis indican que la transparencia es superior al 68% y que esto depende directamente de las capas aplicadas por proyección y de la calidad de la película formada. Los espectros FT-IR respaldan la formación de nanopartículas de SiO_2 , la presencia de grupos -OH en las diferentes etapas del proceso de fabricación de coloides y enlaces C-F. La composición y morfología se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FESEM). Las micrografías FESEM se analizaron en busca de soluciones ultra hidrofóbicas y mostraron aglomeración de nanopartículas. Como trabajo a futuro se propone analizar la resistencia al desgaste de los recubrimientos, su durabilidad y ángulo de deslizamiento, mejorando sus propiedades hidrofóbicas.*

Palabras clave: Recubrimientos ultra-hidrofóbicos; Diseño de experimento; Nanopartículas de SiO_2 ; Método sol-gel; Transparencia



1. Introduction

Material surfaces are highly exposed to environmental conditions [1], contamination, dirt [2-3], dust [4], sand [5], acidic water, oily substances [6], etc. In general, many of these conditions are undesirable since they negatively influence the useful life of the material and its performance [7-8]. Some surfaces are more often faced with certain substances and are therefore more prone to damage [7]. That is why, for some years now, scientists have tried to create surfaces that meet certain needs [8], starting from knowing the characteristics and abilities of some plants and animals.

One of the most studied conditions in recent times is high-hydrophobic condition. Ultra-hydrophobic (UH) surfaces show values of SCA between 120-150° [9], while in superhydrophobic (SH) surfaces are above of 150° [2][6][12-19] between the solid phase and the liquid phase. This characteristic allows a wide number of applications, including self-cleaning [8][10-16], drag reduction [8][12][17], anti-corrosion [8][10][18-21], transparency [8][22-23], anti-icing [16][18-20], oil-water separation [17-18] and so on. This type of surface influences the reduction of maintenance costs [24] and increases the useful life of the materials [25].

There are two approaches to achieve high-hydrophobic conditions: (i) increase surface roughness [26-29], (ii) decrease surface tension [20][30-33]. The first approach is related to the idea of reducing, as much as possible, the contact area between liquid and solid, and in turn, being able to create spaces in which air bubbles can be located [20] [31][34-36] that serve as a barrier (protects the drop from morphological irregularities that can undo them). The second approach is closer to the chemical composition,

which determines the adhesion forces present in the contact area [37-40].

There are compounds that make it possible to achieve superhydrophobic characteristics through the application of the aforementioned approaches, specifically the use of silanes. Vouvoudi et al. [1] manufactured a superhydrophobic coating for the protection of the stone-built cultural heritage. They reported SCA of 170° approximately. To do this, they mixed tetraethyl orthosilicate (TEOS) and 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorooctyl tri-ethoxy silane (FAS). Finally, the versatility of the solution allowed excellent results on at least 3 more substrates [1]. Zhu et al. [26] created a transparent SH coating with good mechanical properties. The silane used was polydimethylsiloxane (PDMS), which is not contaminating like those containing fluorine. The modification achieved by this compound allowed reaching values of SCA higher than 160° and transparency levels higher than 76% [26].

In this article, we report the development of UH and transparent coatings through SCA optimization based on a general full factorial design. The coatings show SCA values greater than 140° and transparency values greater than 65%. The corresponding characterizations were carried out.

2. Methodology

The Figure 1 illustrates the steps to follow in the present investigation.

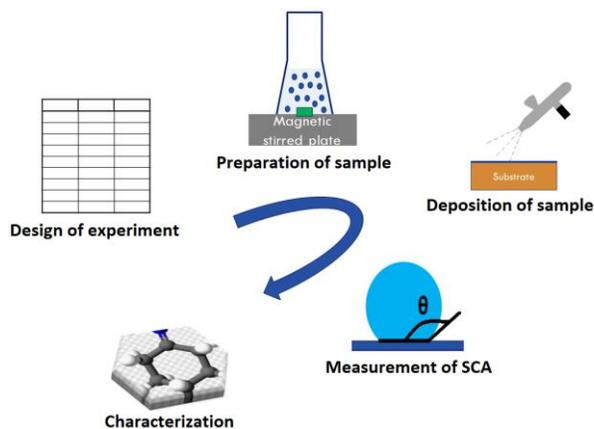


Figure 1. Methodology

2.1 Materials

The following materials were used for the preparation of the coatings: tetraethyl orthosilicate (TEOS), (98% from Sigma-Aldrich) as a precursor for SiO₂ nanoparticles; Ammonium hydroxide (NH₄OH), (NH₃ content 28-30% from Sigma Aldrich®) that influences the size of the nanoparticles; 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecyltriethoxysilane (AC-FAS) (97% from Matrix Scientific®) is applied as a surface modifier; isopropyl alcohol (IPA) and deionized water (DIW).

2.2 Equipments

Stirring hot plate (model PC-420D, CORNING®). Ultrasonic cleaning bath (model TS-2.5L), truSonik®.

2.3 Design of experiment (DOE)

The DOE chosen was a general full factorial design. The Figure 2 illustrates a general analysis for our investigation.

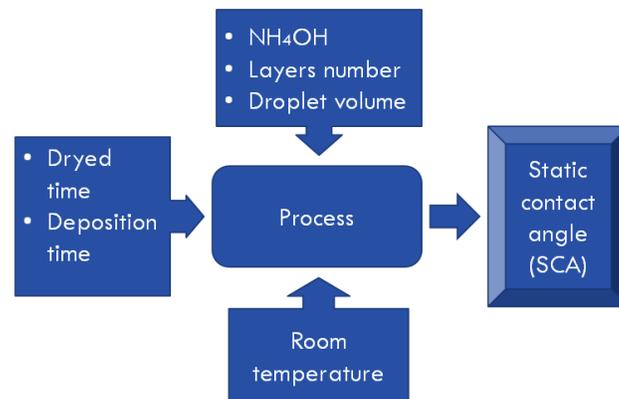


Figure 2. General model of the investigation process

The inputs for this design were the drying time of coatings and deposition time between layers. The controllable factors were the NH₄OH concentration, the number of layers and the applied droplet volume to measure the static contact angle. As an uncontrollable factor, it was only defined at room temperature. The output variable was established as the SCA. All prepared samples were made up to a volume of 50 ml. Table 1 shows the agent volumes in each sample.

Table 1. Agent volumes

Samples	IPA (ml)	DIW (ml)	TEOS (ml)	AC FAS (ml)	NH ₄ OH (ml)
M1	36.8	11.71	1	0.15	0.5
M2	37.04	11.71	1	0.15	0.25
M3	37.24	11.71	1	0.15	0.05
M4	37.265	11.71	1	0.15	0.025

The only difference between samples is the NH₄OH content. This difference made it possible to assess the influence of NH₄OH on SCA.

2.4 Preparation of samples

The preparation procedure proposed by Ge et al. [41]. Prior to the preparation, a deep wash of all the necessary elements (glass Erlenmeyer



flasks, pipette tips, magnetic stirrers) was carried out to develop the preparation of the samples. The washing was carried out with DIW andalconox® detergent, and subsequently they were rinsed with DIW and IPA. The preparation of the solutions was started by stirring a mixture of IPA and DIW at 500 rpm, in a 100 ml glass Erlenmeyer flask, for 10 min. Then NH₄OH and TEOS were added in the order mentioned and kept at the same angular stirring speed for 24 h. After the planned time, the AC-FAS was added and 48 h were waited to turn off the stirring hot plate machine, in this way the preparation process was concluded. The entire process was carried out at room temperature.

2.5 Spray Deposition

Prior depositing the solution on the substrate (26 x 76 x ± 1-1.2 mm glass slides, from Lauka®), it was placed in the ultrasonic cleaning bath machine in order to achieve a greater degree of homogeneity of the solution. The spray gun was also washed as an essential element of the selected method. The spray method was carried out at 15 cm from the substrate placed horizontally, the firing pressure was 0.2 MPa at room temperature. The deposition time between coats was set at 10 min, while the final drying time (time in which the SCAs were measured was 24 h). The drying was carried out naturally (air).

2.6 Characterization

The chemical composition and morphology of the surface, and NPs size analysis were carried out with the use of the field emission scanning electron microscope (FESEM) (JEOL® brand, model JSM-7000F) and energy dispersive spectrometer (EDS). The volume ratio between IPA and samples was 10: 1, and it was deposited on a carbon adhesive tape. Fourier transform infrared (FT-IR) spectrophotometer (BUCK Scientific®, model 530), it was used to identify the functional groups in a wavenumber interval of 600-4000 cm⁻¹, and a

resolution of 0.8 cm⁻¹; the samples had to be prepared with potassium bromide (KBr). Ultraviolet visible light (UV-vis) spectrophotometer (series AF1311015) was used to determine the light transmittance in a range of 380-760 nm with intervals of 1 nm. SCA measurement was achieved with a Profile Projector (Mitutoyo Corporation®, model PH-A14).

3 Results and Discussion

3.1 Statistical analysis

Images for SCA measurement were obtained using a profile projector and analyzed with the ImageJ software. Table 2 shows the SCA values.

Table 2. Static contact angles

Samples	SCA-5 µl (°)	SCA-10 µl (°)
M1 (2 layers)	147±2	146.2±3
M1 (4 layers)	152.55±1	150.6±2
M2 (2 layers)	148.4±2	148.2±2
M2 (4 layers)	150±2	150.3±2
M3 (2 layers)	146.8±3	143.3±2
M3 (4 layers)	151.4±2	151±1
M4 (2 layers)	145.9±3	144.1±3
M4 (4 layers)	151.8±1	151.7±1

Table 2 presents all the values in a range of 141-153° when the highest value was 152.55 ± 1° and it was reached in M1. Table 2 shows that, as the number of layers increases, the SCA increases. The number of layers is a factor that can be directly related to the thickness of the coating, because, as the number of layers increases, the thickness increases. Ge et al. [41] investigated the influence of thickness on SCA for a coating obtained from the mixture of two



silanes, TEOS and (heptadecafluoro-1,1,2,2-tetrahydrodecyl)triethoxysilane (HDFTES), with a stringed SiO₂ NPs. The result shows that when increasing the thickness of 2-8 μm, the SCA increased from 160.5-165.5⁰ approximately [41]. This result coincides with the result obtained in this investigation. Purcar et al. [42] reported the influence of thickness on the SCA of SiO₂-based coatings obtained from TEOS and modified with alkoxy silane mixtures using the sol-gel method. The alkoxy silanes used were methyl triethoxysilane (MTES), octyltriethoxysilane (OTES), vinyltrimethoxysilane (VTMES), and hexadecyltrimethoxysilane (HDTMES). The thicknesses for TEOS/MTES/OTES, TEOS/MTES/VTMES and TEOS/MTES/HDTMES were 3522.8, 1288.0 and 1584.9 nm respectively; their respective SCAs for the thicknesses obtained were 104, 88 and 106⁰ [42]. The presence of a second factor included in the analysis caused a change in the results. This time the study included, in addition to thickness, the type of alkoxy silane, which led to the loss of the relationship obtained in the present study and increases in SCA were not achieved with increasing thickness.

Using the Minitab® 17 software, it performed the general full factorial design to determine if the factors taken into account significantly influence the response variable. The experiment was randomized and replicated to ensure a more reliable test. Figure 3 presents the results of the analysis.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	P-Value
Model	15	232.520	15.501	0.000
Linear	5	187.300	37.460	0.000
NH4OH	3	9.488	3.163	0.002
Capa	1	166.531	166.531	0.000
Gota	1	11.281	11.281	0.000
2-Way Interactions	7	32.812	4.687	0.000
NH4OH*Capa	3	22.711	7.570	0.000
NH4OH*Gota	3	7.221	2.407	0.006
Capa*Gota	1	2.880	2.880	0.016
3-Way Interactions	3	12.408	4.136	0.000
NH4OH*Capa*Gota	3	12.408	4.136	0.000
Error	16	6.380	0.399	
Total	31	238.900		

Figure 3. P-Value analysis

Taking into account a confidence level of 95%, the significant factors will be those that do not exceed the level of significance (0.05). As can be seen, the three factors proposed in the experiment showed p-values lower than the reference value mentioned above. Similarly, double and triple interactions have p-values lower than the reference value. All this information allows us to declare that all the factors and their interactions will be significant for the response variable. It also generated the main effects plot for SCA to more easily observe the influence of each factor on the response variable. Figure 4 presents the directions we can choose from each factor to increase SCA.

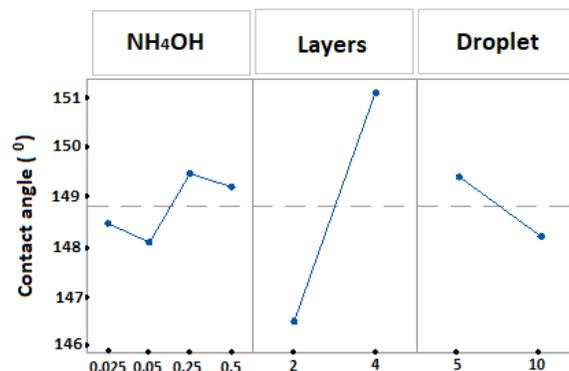


Figure 4. Main effects plot for SCA (fitted means)

Figure 4 presents the behavior of each factor in this investigation. The NH₄OH factor showed better SCA values at the levels with the highest concentration of NH₃; the number of layers confirmed that as it increased, the values of the response variable increased too; while an increase in drop volume tends to decrease SCA. These SCA results make it possible to ensure that the three factors influence the achievement of ultrahydrophobicity (120 < SCA ≤ 150⁰); in addition, in the particular case of number of layers, 4 layers allowed achieving superhydrophobicity (SCA > 150⁰). Figure 5 allows a double interaction analysis of the factors.

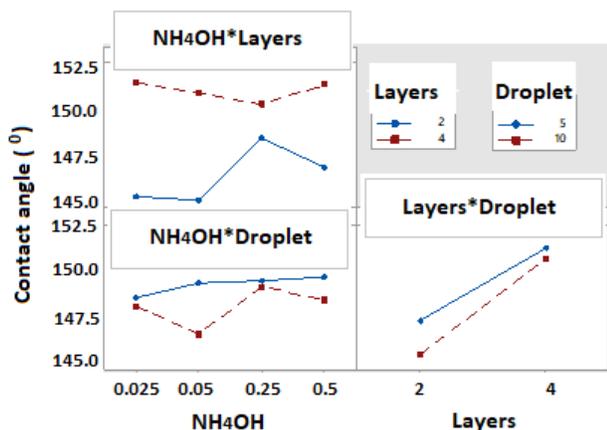


Figure 5. Interaction plot for SCA (fitted means)

This figure shows the interactions between factors, and it is evidenced that the least interaction is established between NH_4OH and number of layers. On the other hand, between number of layers and drop volume a certain closeness and similar direction is perceived, which allows to ensure that it is the interaction that has the most effect on SCA; the highest SCA values were reached for this interaction.

The response variable was maximized to determine the 5 best combinations of factors. Figure 6 shows the response optimizer.

Solution	NH_4OH	Layers	Droplet	SCA fit
1	0.5	4	5	152.55
2	0.025	4	10	151.80
3	0.025	4	5	151.35
4	0.05	4	5	151.15
5	0.05	4	10	150.85

Figure 6. Response optimizer.

Fig. 6 allows determining the combinations of factors with the highest SCA values. The response optimizer presented the 5 highest SCA values in the study. All combinations met the maximum number of layers deposited (4 layers), this confirms the idea that to achieve superhydrophobic surfaces it was necessary to

apply 4 layers of coatings. The highest value obtained was $152,55^\circ$.

3.2 Functional groups analysis

The analysis of the functional groups was carried out with a FT-IR. In Figure 7 the spectrum generated by the SiO_2 NPs is observed.

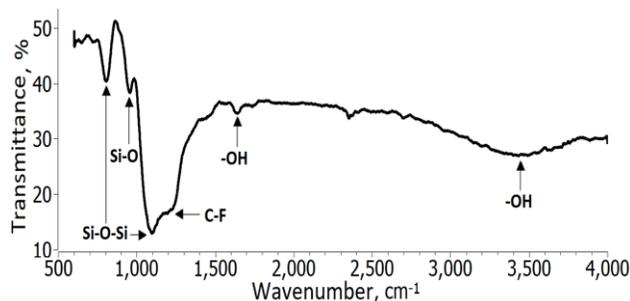


Figure 7. FT-IR spectrum (sample M3)

In the FT-IR spectrum of glass substrate, a broad band were identified from $2750\text{-}3800\text{ cm}^{-1}$ with center at approximately 3400 cm^{-1} , corresponding to the hydroxyl stretching ($-\text{OH}$ stretching vibrations) [1][37-39], then another $-\text{OH}$ group was observed around 1630 cm^{-1} . The C-F stretching vibrations peak at 1204 cm^{-1} was easily recognized in the spectrum [41][43]; these groups are characterized by having low energy, they are attributed a decrease in the surface energy of the coating. The peak at 1100 cm^{-1} was attributed to the most characteristic peak of the SiO_2 nanoparticles [1][37-38], which is assigned to the asymmetric stretching, symmetric stretching and bending vibration. Finally, two more peaks were located below 1000 cm^{-1} : (i) at 950 cm^{-1} (Si-O bond) [42] and (ii) at 793 cm^{-1} belong to vibrations Si-O-Si bonds [1][26][41][44] attributed to the bending vibrations.



3.3 Chemical composition

The chemical composition was evaluated with the use of FESEM-EDS. The solution was analyzed before adding the AC-FAS and another with all the reagents that make up the coating. In addition, images of the distribution of each chemical element in each sample were obtained, as shown in Figure 8.

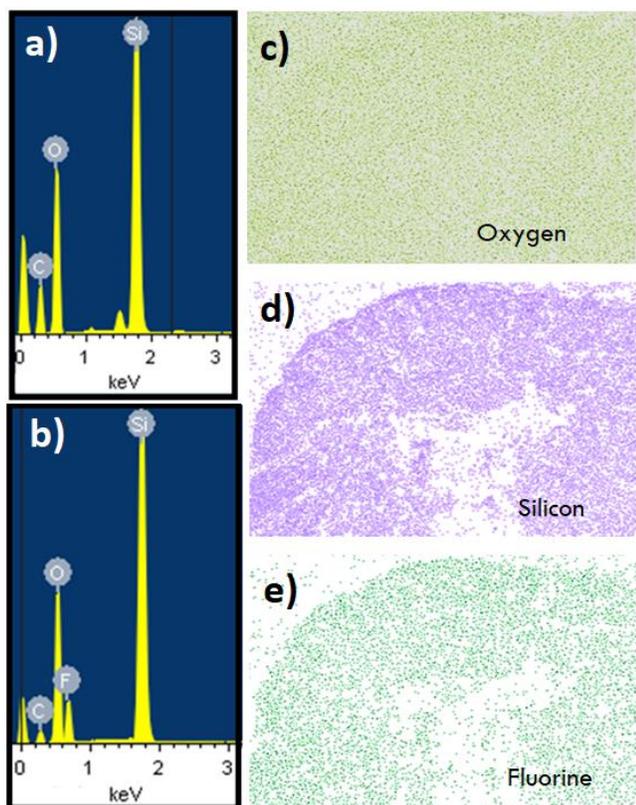


Figure 8. FESEM (EDS mapping) images (sample M3): (a) Solución sin AC-FAS, (b) solución con AC-FAS, (c) Oxygen map, (d) Silicon map, and (e) Fluorine map.

In Figure 10 (a, b), the presence of Si, O and C is observed, while F only appears in Figure 10b due to the addition of AC-FAS. All chemicals were evenly distributed over the entire surface, suggesting that the preparation method used was appropriate to achieve a uniform coating.

3.4 Surface morphological study

The morphological analysis was carried out in FESEM. Figure 9 showed the surface morphology of the sample M3.

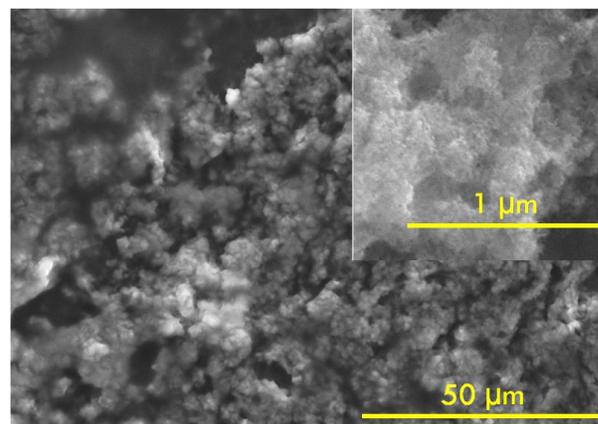


Figure 9. FESEM (secondary electrons) images (sample M3)

The images obtained in SEM showed a large agglomeration of particles. This agglomeration can be a consequence of the addition of AC-FAS. This agglomeration can also decrease the degree of hydrophobicity, and can be the cause of a decrease in the percentage of light transmittance. Finally, particle agglomeration made particle size determination impossible.

3.5 Transparency analysis

The transparency of all samples (2 and 4 layers) was determined by using the UV-vis spectrophotometer; all analysis was performed in the wavelength interval 380-760 nm. Figure 10 shows the transmittance spectra of the coatings.

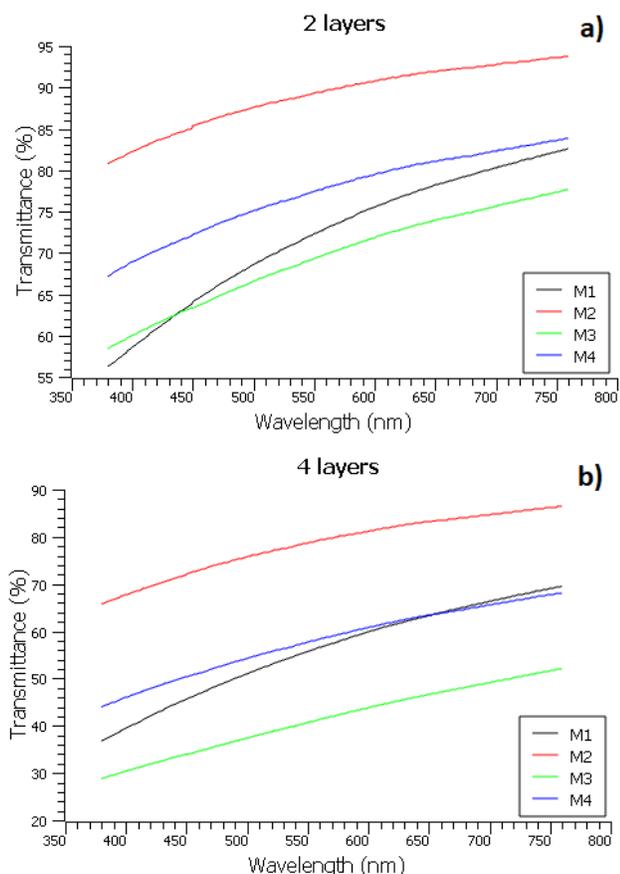


Figure 10. Transmittance spectra UV-vis: (a) 2 layers, (b) 4 layers.

As shown in Figure 10a, the M2 lost 11% of the transmittance compared to an uncoated glass (100%), for 89% of transmittance, approximately. The other samples presented average values in a range of 68-80%. When the number of layers was increased to 4 (Figure 10b), there was a loss of transmittance of 23% (sample 2), while the others were less than 60%. These results suggested that by increasing the number of layers there was an increase in surface roughness, which led to an increased light scattering, thus decreasing the light transmittance. In this case, the number of layers is analogous to the number of cycles, which increases the thickness of the coating as it increases. H. Teisala et al. [45] transparency was investigated using UV-vis spectrophotometer for different Si/Ti ratios. The results were obtained by

applying 1 and 5 coating cycles on the substrate. For 1 cycle, all transmittance values were greater than 98% for wavelengths greater than 500 nm. For 5 cycles, 97% were obtained in Si-100% and 79% with Si-1%, which indicated a decrease in transmittance as the concentration of Si in the coatings decreased [45]. It can be noted that this result agrees with the result obtained in our study, the increase in the number of cycles has a negative effect on the level of transparency [45]. Ge et al. [41] investigated the influence of thickness on the transparency results of coatings made with a TEOS/HDFTES solution with stringed SiO₂ nanoparticles. The range in which the measurements were made was 3-8 μm and it was observed that as the thickness increased there was a decrease in transmittance; the transmittance obtained was approximately 91.5% at 550 nm for a thickness of 5 μm [41]. This result also confirms our result.

4 Conclusions

Ultra-hydrophobic coatings based on SiO₂ nanoparticles were developed using the sol-gel method. The SCA obtained exceeded 140⁰, reaching values above 150⁰ (super-hydrophobicity). The influence of three factors (NH₄OH, number of layers and droplet volume) on the ACS was analyzed using a general full factorial design with a 95% confidence level. All the factors were statistically significant for the output variable. By increasing NH₄OH there was an increase in SCA; when the number of layers increased, the SCA also increased; while with increasing droplet volume, SCA decreased. Other studies show similar results for the number of layers because it is related to the increase in surface roughness; This factor is also the main responsible for achieving SCA values higher than 150⁰.



The FESEM images showed an excessive agglomeration of particles, an aspect that must have had a negative impact on the results of contact angles and that prevented the determination of the particle size; agglomeration was attributed to AC-FAS.

The analysis of functional groups permitted to identify SiO₂ nanoparticles, which shows that the sol-gel method is appropriate for this objective; It was possible to verify the presence of C-F groups, to which the decrease in the surface energy of the coating and the high degree of hydrophobicity due to its low energy are attributed.

Transparency levels of 68-89% were achieved. The number of layers negatively influenced the level of transparency, reducing the transmittance of sample M2 from 89 to 77 for 2 and 4 layers respectively. This result was consistent with studies conducted by other researchers.

In this study, we managed to include a factor not widely studied: droplet volume. In addition, the coatings developed can be implemented in applications such as self-cleaning, anti-reflection, anti-corrosion, among others.

5. Acknowledgements

To Universidad Autónoma de Ciudad Juárez/Instituto de Ingeniería y Tecnología, and CONACyT.

6. Authorship and Contribution

Jose Felix Magdaleon Loreda: Conceptualization, methodology, validation, formal analysis, research, original draft, revision-edition, visualization, project supervision-administration, data analysis. *Delfino Cornejo Monroy:* Conceptualization, methodology, research, revision-edition, project supervision-administration.

References

- [1] E. C. Vouvoudi, F. G. Adamopoulos, E. Pavlidou, D. S. Achilias, and I. Karapanagiotis, "TEOS-Based Superhydrophobic Coating for the Protection of Stone-Built Cultural Heritage," *Coatings*, pp. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.3390/coatings11020135>
- [2] I. S. Bayer, "Superhydrophobic Coatings from Ecofriendly Materials and Processes: A Review," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 13, pp. 1-25, 2020. <https://doi.org/10.1002/admi.202000095>
- [3] B. Li and J. Zhang, "Durable and self-healing superamphiphobic coatings repellent even to hot liquids," *Chem. Commun.*, vol. 52, no. 13, pp. 2744-2747, 2016. <https://doi.org/10.1039/C5CC09951J>
- [4] M. R. Ghadimi and A. Dolati, "Preparation and characterization of superhydrophobic and highly oleophobic FEVE-SiO₂ nanocomposite coatings," *Prog. Org. Coatings*, vol. 138, no. April 2019, p. 105388, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105388>
- [5] M. Ferrari and F. Cirisano, "High transmittance and highly amphiphobic coatings for environmental protection of solar panels," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 286, p. 102309, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102309>
- [6] T. N. H. Lo, H. S. Hwang, J. Lee, and I. Park, "Synthesis of new semi-fluorinated polysilazanes and their amphiphobic coating applications," *Prog. Org. Coatings*, vol. 148, no. June, p. 105853, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105853>
- [7] X. Han, J. Peng, S. Jiang, J. Xiong, Y. Song, and X. Gong, "Robust Superamphiphobic Coatings Based on Raspberry-like Hollow SnO₂Composites," *Langmuir*, vol. 36, no. 37, pp. 11044-11053, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01923>
- [8] Y. Bai, H. Zhang, Y. Shao, H. Zhang, and J. Zhu, "Recent progresses of superhydrophobic coatings in different application fields: An overview," *Coatings*, vol. 11, no. 2, pp. 1-30, 2021. <https://doi.org/10.3390/coatings11020116>



[9] L. Álvarez-Gil, J. Ramírez, and P. Fernández-Morales, "Ultra-hydrophobic aluminum foam development for potential application in continuous water-oil separation processes," *Surfaces and Interfaces*, vol. 26, no. July, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101362>

[10] V. Sharma et al., "Recent progress in nano-oxides and CNTs based corrosion resistant superhydrophobic coatings: A critical review," *Prog. Org. Coatings*, vol. 140, no. December 2019, p. 105512, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105512>

[11] J. Zhang, B. Yu, Z. Gao, B. Li, and X. Zhao, "Durable, transparent, and hot liquid repelling superamphiphobic coatings from polysiloxane-modified multiwalled carbon nanotubes," *Langmuir*, vol. 33, no. 2, pp. 510-518, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b04213>

[12] Y. Wang and X. Gong, "Special oleophobic and hydrophilic surfaces: approaches, mechanisms, and applications," *J. Mater. Chem. A*, vol. 5, no. 8, pp. 3759-3773, 2017. <https://doi.org/10.1039/C6TA10474F>

[13] W. Yao, L. Li, O. L. Li, Y. W. Cho, M. Y. Jeong, and Y. R. Cho, "Robust, self-cleaning, amphiphobic coating with flower-like nanostructure on micro-patterned polymer substrate," *Chem. Eng. J.*, vol. 352, no. June, pp. 173-181, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.001>

[14] F. Cirisano, A. Benedetti, L. Liggieri, F. Ravera, E. Santini, and M. Ferrari, "Amphiphobic coatings for antifouling in marine environment," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 505, pp. 158-164, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.03.045>

[15] J. Li et al., "Superhydrophobic Methylated Silica Sol for Effective," 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13040842>

[16] P. Nguyen-Tri et al., "Recent progress in the preparation, properties and applications of superhydrophobic nano-based coatings and surfaces: A review," *Prog. Org. Coatings*, vol. 132, no. January, pp.

235-256, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.03.042>

[17] E. Vazirinasab, R. Jafari, and G. Momen, "Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 341, no. October 2017, pp. 40-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.11.053>

[18] G. Barati Darband, M. Aliofkhaezrai, S. Khorsand, S. Sokhanvar, and A. Kaboli, "Science and Engineering of Superhydrophobic Surfaces: Review of Corrosion Resistance, Chemical and Mechanical Stability," *Arab. J. Chem.*, vol. 13, no. 1, pp. 1763-1802, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>

[19] S. Das, S. Kumar, S. K. Samal, S. Mohanty, and S. K. Nayak, "A Review on Superhydrophobic Polymer Nanocoatings: Recent Development and Applications," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 57, no. 8, pp. 2727-2745, 2018. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b04887>

[20] A. Hooda, M. S. Goyat, J. K. Pandey, A. Kumar, and R. Gupta, "A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of superhydrophobic coatings," *Prog. Org. Coatings*, vol. 142, no. January, p. 105557, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105557>

[21] S. P. Dalawai et al., "Recent Advances in durability of superhydrophobic self-cleaning technology: A critical review," *Prog. Org. Coatings*, vol. 138, no. May 2019, p. 105381, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105381>

[22] Z. Liang, M. Geng, B. Dong, L. Zhao, and S. Wang, "Transparent and robust SiO₂/PDMS composite coatings with self-cleaning," *Surf. Eng.*, vol. 36, no. 6, pp. 643-650, 2020. <https://doi.org/10.1080/02670844.2019.1691367>

[23] U. Mehmood, F. A. Al-Sulaiman, B. S. Yilbas, B. Salhi, S. H. A. Ahmed, and M. K. Hossain, "Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: A critical review," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 157, pp. 604-623, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.038>



[24] X. Zhao, D. S. Park, J. Choi, S. Park, S. A. Soper, and M. C. Murphy, "Robust, transparent, superhydrophobic coatings using novel hydrophobic/hydrophilic dual-sized silica particles," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 574, pp. 347-354, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.065>

[25] W. Lin, X. Zhang, Q. Cai, W. Yang, and H. Chen, "Dehydrogenation-driven assembly of transparent and durable superhydrophobic ORMOSIL coatings on cellulose-based substrates," *Cellulose*, vol. 27, no. 13, pp. 7805-7821, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03288-2>

[26] T. Zhu et al., "A transparent superhydrophobic coating with mechanochemical robustness for anti-icing, photocatalysis and self-cleaning," *Chem. Eng. J.*, vol. 399, no. June, p. 125746, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125746>

[27] J. Liu, X. Jiao, F. Cheng, Y. Fan, Y. Wu, and X. Yang, "Fabrication and performance of UV cured transparent silicone modified polyurethane-acrylate coatings with high hardness, good thermal stability and adhesion," *Prog. Org. Coatings*, vol. 144, no. March, p. 105673, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105673>

[28] G. Fortunato, V. Marroccoli, F. Corsini, S. Turri, and G. Griffini, "A facile approach to durable, transparent and self-healing coatings with enhanced hardness based on Diels-Alder polymer networks," *Prog. Org. Coatings*, vol. 147, no. June, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105840>

[29] J. Dong et al., "Colorful superamphiphobic coatings with low sliding angles and high durability based on natural nanorods," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 9, no. 2, pp. 1941-1952, 2017. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13539>

[30] N. Pratiwi, Zulhadjri, S. Arief, Admi, and D. V. Wellia, "Self-cleaning material based on superhydrophobic coatings through an environmentally friendly sol-gel method," *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 96, no. 3, pp. 669-678, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05389-7>

[31] F. Sharifianjazi et al., "Effects of Sr and Mg dopants on biological and mechanical properties of SiO₂-CaO-P₂O₅ bioactive glass," *Ceram. Int.*, vol. 46, no. 14, pp. 22674-22682, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.030>

[32] A. Jaafar, C. Hecker, P. Árki, and Y. Joseph, "Sol-gel derived hydroxyapatite coatings for titanium implants: A review," *Bioengineering*, vol. 7, no. 4, pp. 1-23, 2020. <https://doi.org/10.3390/bioengineering7040127>

[33] C. Chen et al., "Microstructure-controllable nanocomplexes bulk possessed with durable superhydrophobicity," *Chem. Eng. J.*, vol. 389, no. January, p. 124420, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124420>

[34] L. Vivar Mora et al., "Impact of silica nanoparticles on the morphology and mechanical properties of sol-gel derived coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 342, no. 2017, pp. 48-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.080>

[35] F. Wang et al., "A superhydrophobic coating to create multi-functional materials with mechanical/chemical/physical robustness," *Chem. Eng. J.*, vol. 381, no. March 2019, p. 122539, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122539>

[36] J. Zhang et al., "Preparation of humidity, abrasion, and dust resistant antireflection coatings for photovoltaic modules via dual precursor modification and hybridization of hollow silica nanospheres," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 192, no. June 2018, pp. 188-196, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12.032>

[37] Y. Zhang, B. Dong, S. Wang, L. Zhao, L. Wan, and E. Wang, "Mechanically robust, thermally stable, highly transparent superhydrophobic coating with low-temperature sol-gel process," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 75, pp. 47357-47365, 2017. <https://doi.org/10.1039/C7RA08578H>

[38] D. Adak, R. Bhattacharyya, H. Saha, and P. S. Maiti, "Sol-gel processed silica based highly transparent self-cleaning coatings for solar glass covers," *Mater. Today Proc.*, vol. 33, no. xxxx, pp.



- 2429-2433, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.331>
- [39] S. Arya et al., "Review-Influence of Processing Parameters to Control Morphology and Optical Properties of Sol-Gel Synthesized ZnO Nanoparticles," ECS J. Solid State Sci. Technol., vol. 10, no. 2, p. 023002, 2021.
<https://doi.org/10.1149/2162-8777/abe095>
- [40] M. Chodkowski, K. Terpiłowski, and S. Pasieczna-Patkowska, "Fabrication of transparent polysiloxane coatings on a glass support via the sol-gel dip coating technique and the effect of their hydrophobization with hexamethyldisilazane," Physicochem. Probl. Miner. Process., vol. 56, no. 6, pp. 76-88, 2020.
<https://doi.org/10.37190/ppmp/126806>
- [41] D. Ge, L. Yang, Y. Zhang, Y. Rahmawan, and S. Yang, "Transparent and superamphiphobic surfaces from one-step spray coating of stringed silica nanoparticle/sol solutions," Part. Part. Syst. Charact., vol. 31, no. 7, pp. 763-770, 2014.
<https://doi.org/10.1002/ppsc.201300382>
- [42] R. Manea et al., "Preparation and Characterization of Some Sol-Gel Modified Silica Coatings Deposited on Polyvinyl Chloride (PVC) Substrates," Coatings, 2021.
<https://doi.org/10.3390/coatings11010011>
- [43] A. K. Schmidt-Verma et al., "High-Temperature Ultrahydrophobic Ceramic Coatings from Surface-Functionalized MgAl₂O₄ Nanoparticles," Adv. Eng. Mater., vol. 23, no. 2, pp. 2-9, 2021.
<https://doi.org/10.1002/adem.202000738>
- [44] L. Ye, Y. Zhang, C. Song, Y. Li, and B. Jiang, "A simple sol-gel method to prepare superhydrophilic silica coatings," Mater. Lett., vol. 188, pp. 316-318, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.09.043>
- [45] H. Teisala et al., "Ultrafast Processing of Hierarchical Nanotexture for a Transparent Superamphiphobic Coating with Extremely Low Roll-Off Angle and High Impalement Pressure," Adv. Mater., vol. 30, no. 14, pp. 1-8, 2018.
<https://doi.org/10.1002/adma.201706529>



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](#)



Índice sintético para la evaluación intraurbana de la vivienda inadecuada y su aplicación en la ciudad de Mexicali

Synthetic index for the intra-urban evaluation of inadequate housing and its application in the city of Mexicali

Jesús Ricardo Salazar Ramírez ¹, Judith Ley García ²

¹Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California. Blvd. Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, CP. 21280, Mexicali, Baja California, México

²Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Baja California. Blvd. Benito Juárez S/N, CP. 21280, Mexicali, Baja California, México

Recibido: 22 de Octubre del 2021 **Aceptado:** 23 de Diciembre del 2021 **Publicado:** 15 de Diciembre del 2021

Resumen. - *El objetivo del artículo es presentar una propuesta metodológica para la evaluación de la vivienda inadecuada al interior de las ciudades, mediante un índice que surge de la operacionalización de variables (OV), donde se toman como base las directrices del derecho a una vivienda adecuada desde el enfoque de las capacidades. Para tal fin, se tomó como caso de estudio la ciudad de Mexicali, una ciudad de la frontera norte de México, cuyas características geográficas, económicas y demográficas se manifiestan en condiciones distintas de calidad del espacio construido. El índice de vivienda inadecuada propuesto permitió identificar que más de la mitad de las viviendas en Mexicali son inadecuadas porque carecen de condiciones materiales apropiadas, no tienen espacios suficientes y están expuestas tanto a peligros naturales, como a contaminación ambiental. Además de que carecen de acceso a equipamiento y fuentes de empleo.*

Palabras clave: Vivienda adecuada; Vivienda inadecuada; Indicadores intraurbanos; Índice sintético; Enfoque de las capacidades.

Abstract. - *The objective of the article is to present a methodological proposal for the evaluation of inadequate housing inside the cities, through an index that arises from the operationalization of variables (OV), this captures the guidelines of the right to adequate housing grounded on the capabilities approach. The Mexican border city of Mexicali was chosen as a study case since its geographic, economic, and demographic characteristics translate into a built space with diverse qualities. Through this index, we identify that more than half of the urban housing stock in Mexicali is inadequate because they lack appropriate material conditions, do not have sufficient spaces, and are exposed to both natural hazards and environmental contamination. In addition, they lack access to equipment and sources of employment.*

Keywords: Adequate housing; Inadequate housing; Intraurban indicators; Synthetic index; Capabilities approach.

1. Introducción

Debido a que en las ciudades vive más de la mitad de la población mundial [1] y que tienden a crecer aceleradamente, el papel que desempeña la vivienda en el bienestar de los habitantes urbanos ha sido motivo de preocupación para la Asamblea General de las Naciones Unidas. Esta preocupación se refleja en programas (ONU-Hábitat), conferencias (Hábitat) y agendas (Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y la Nueva Agenda Urbana) [2], donde se considera que es urgente elaborar más y mejores indicadores para ampliar la base del conocimiento de las realidades urbanas. Pues, los indicadores se conciben como una herramienta para monitorear, evaluar y revisar las condiciones, tendencias y problemas urbanos, como la vivienda y su entorno.

En este sentido, el documento Observación General No. 4, relativo al derecho a una vivienda adecuada, destaca la necesidad de "proporcionar información detallada sobre aquellos grupos de la sociedad que se encuentran en una situación vulnerable y desventajosa en materia de vivienda" [3]. No obstante, los indicadores urbanos actuales de vivienda solo proporcionan porcentajes en escalas nacionales y globales que sirven para propósitos situacionales y comparativos [4].

Diferentes informes internacionales examinan esa situación, en ellos se expresa la necesidad de desagregar la información de la escala global a escalas más pequeñas, como la urbana [5]. Ya que, en este nivel de agregación, se pueden utilizar sistemas de georreferenciación para detectar, caracterizar y cuantificar las violaciones en materia de vivienda al interior de las ciudades (escala intraurbana). Sin embargo, la diversidad de propuestas de baterías de indicadores (e índices) para la medición y evaluación de la vivienda, no tienen bases teóricas bien definidas.

Cabe resaltar, que las propuestas de indicadores revisadas [6-15] no abordan totalmente las directrices del derecho a una vivienda adecuada ni procuran la integración de estas en un índice sintético para visualizar, en mapas temáticos, diferencias socio-espaciales al interior de las ciudades.

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo del artículo es presentar una propuesta metodológica para la evaluación de la vivienda inadecuada al interior de las ciudades, mediante un índice sintético que toma como base las directrices del derecho a una vivienda adecuada desde el enfoque de las capacidades.

1.1. *El enfoque de las capacidades*

A pesar de que, tanto los programas de la ONU, como el marco de los derechos humanos tienen resonancia en el discurso político actual, Nussbaum [16] señala que esto no se debe a la claridad teórica y conceptual que guardan, ya que las ideas componentes están enraizadas en muchas tradiciones. La autora destaca que el uso común del lenguaje de los derechos humanos da la ilusión de un acuerdo cuando, en realidad, existe un profundo desacuerdo filosófico. Nussbaum considera que la forma de fundamentar aquellos temas concernientes al derecho de propiedad es en términos de capacidades, dado que estas permiten analizar cómo las personas están habilitadas para vivir una buena vida.

El enfoque de las capacidades (EC), desarrollado por Sen [17] y ampliado por Nussbaum, tiene tres conceptos principales: 1) la capacidad, entendida como la habilidad de una persona para realizar actos valiosos o alcanzar estados valiosos de ser; 2) la libertad, que refiere a un conjunto de oportunidades para elegir y actuar; y 3) los funcionamientos, que conjugan a los anteriores en acciones realizadas, o logros concretados. Estos últimos abarcan

tanto cosas elementales (p. ej. estar bien nutrido, tener buena salud, evitar posibles enfermedades y mortalidad prematura), como complejas (p. ej. tener dignidad, ser feliz) [18].

Los enfoques clásicos del bienestar presentan ciertas desventajas. Por ejemplo, en la evaluación de utilidad (satisfacción) se distorsionan los resultados cuando las personas desfavorecidas o en desventaja se encuentran satisfechas con su nivel de vida al creer que no pueden obtener algo mejor; es decir, cuando los estados subjetivos de la mente son adaptados y ajustados [16] para justificar la realidad vigente.

En cambio, el enfoque de las capacidades evalúa el bienestar por medio de la libertad, que concierne a la oportunidad real que se tiene para alcanzar aquello que se valora. Desde esta perspectiva, la mejor forma de abordar el derecho a la vivienda es en términos de capacidades, puesto que estas permiten conocer si el derecho es realmente exitoso en expandir tanto las libertades como el poder que tienen las personas, titulares del derecho, para hacer y ser [19].

1.2. Las capacidades y la vivienda adecuada

Nussbaum [16] sostiene que las capacidades pueden ser el objeto de un acuerdo entre personas; es decir, las capacidades centrales de los humanos se pueden determinar por medio de un consenso político. Al respecto, la autora desarrolla y propone una lista acordada de diez capacidades funcionales humanas o habilidades para satisfacer funcionamientos centrales¹. En dicha lista la importancia de la vivienda en el bienestar es reconocida, específicamente en la capacidad de salud corporal, que considera el hecho de tener un refugio adecuado (*adequate shelter*) como uno de los componentes esenciales para gozar de buena salud. No obstante, las características que el refugio debe poseer no se definen en la lista.

No obstante, para ello podemos utilizar el trabajo desarrollado por el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (CDESC) [3] de la ONU, donde definen las características del refugio o vivienda (adecuada). De tal manera que una vivienda será inadecuada si carece de: D1) *Seguridad legal de la tenencia*, pues impide la protección legal de las personas contra desalojos, hostigamiento y otras amenazas; D2) *Disponibilidad de servicios, materiales, instalaciones e infraestructura* (saneamiento adecuado, agua potable, energía, iluminación, almacenamiento de alimentos y eliminación de desechos); D3) *Habitabilidad*, porque no garantiza la seguridad física o no proporciona espacios adecuados ni protección con respecto al entorno. Además, será inadecuada si no presenta: D4) *Gastos soportables*, pues su costo amenaza o compromete el disfrute de otros derechos humanos; D5) *Asequibilidad*, ya que no se tienen en cuenta las necesidades y recursos específicos de los grupos desfavorecidos y marginados en la producción de vivienda; D6) *Lugar apropiado*, ya que está aislada de oportunidades (p. ej. empleo, servicios de salud, escuelas, guarderías) o se encuentra ubicada en sitios peligrosos o contaminados; y D7) *Adecuación cultural*, pues no respeta o impide la expresión de la identidad cultural y los modos de vida de sus ocupantes.

Las directrices anteriores son aplicables a cualquier contexto, independientemente de la condición social, económica, religiosa o cultural del lugar; además, son el resultado de una extensa investigación que involucró el consenso de los Estados miembros de la ONU. Por tal motivo, se puede considerar que existe el consenso político sugerido por Nussbaum [16] en las características de adecuación o inadecuación incluidas, definidas y justificadas.

En relación con las capacidades centrales propuestas por Nussbaum [16], una vivienda

¹ Los funcionamientos centrales son: vida; salud corporal; integridad corporal; sentidos, imaginación y

pensamiento; emociones; razón práctica; afiliación; otras especies; jugar; y control sobre el entorno de cada uno.

adecuada buscare habilitar los funcionamientos de *vida, salud corporal e integridad corporal*, puesto que ser capaz de mantenerse con vida, de gozar de buena salud y no recibir daños, requiere que la vivienda cumpla con criterios de *habitabilidad y disponibilidad de servicios* (D3 y D2) que, entre otras cosas, buscan la seguridad, los espacios suficientes, la higiene y la comodidad del habitante. En este sentido, Sen [20] señala que la vivienda confiere a las personas la habilidad de estar bien protegidos, que en situaciones de pobreza representa un funcionamiento de importancia central.

Asimismo, las capacidades de *sentidos, imaginación y pensamiento; razón práctica; otras especies y jugar*, pueden verse restringidas por las condiciones del lugar (D6); dado que, las opciones de educación, recreación y esparcimiento que pueden cultivar los sentidos, la imaginación y el razonamiento, así como permitir el interés por la naturaleza y el disfrute de actividades recreativas, dependen de la distribución urbana de equipamiento y empleo. Otra directriz relacionada con la capacidad de *sentidos, imaginación y pensamiento* es la *adecuación cultural* (D7), que aboga por la expresión de la identidad cultural, donde la producción de obras auto-expresivas (con libertad de expresión), pueden representar manifestaciones de la identidad (la vivienda puede ser una de ellas).

En cuanto a la capacidad de *emociones*, que alude a tener vínculos afectivos, la *adecuación cultural* (D7) también interviene, al considerarse que la vivienda “constituyen un almacén emocional donde se forma la identidad” [21]; igualmente, Oswald [22] considera que las expectativas y preferencias por determinadas formas de vivienda son necesidades derivadas de experiencias tanto personales y familiares, como de normas culturales, estas últimas entendidas como expectativas comunes respecto a un estándar de vivienda aceptable.

Por su parte, la *seguridad jurídica de la tenencia* (D1) se relaciona con la capacidad de *emociones*, debido a que el desalojo forzoso,

hostigamiento o amenazas con respecto a la tenencia, pueden ocasionar miedos y ansiedades abrumadoras que restrinjan el sano desarrollo emocional de las personas. La capacidad de *razón práctica* puede ser impulsada por la *habitabilidad* (D3) y la ubicación de la vivienda (D6), dado que en ella se pasa más de la mitad de la vida [6], los espacios cotidianos pueden ser lugar para la reflexión crítica de la planificación de la vida. Otra capacidad relacionada con la directriz de *habitabilidad* (D3) es la *afiliación*, debido a que los espacios al interior de la vivienda pueden habilitar las interacciones interpersonales; además, la *afiliación* guarda una estrecha relación con la *asequibilidad* (D5), ya que se basan en la no discriminación.

Por último, la capacidad de *control sobre el entorno de cada uno* presenta vínculos con cuatro directrices de la vivienda; en mayor medida, con la *seguridad jurídica de la tenencia* y la *asequibilidad* (D1 y D5) ya que ambas apoyan el derecho sobre la propiedad de manera legal y en igualdad. De forma matizada guarda relación, por un lado, con *gastos soportables* (D4), pues, como expone Malpass [23] la vivienda es el elemento de mayor consumo individual en la vida de las personas. En otras palabras, ser capaz de poseer un inmueble de manera legal está supeditado por el ingreso; por el otro lado, debido a que la ubicación de la vivienda puede facilitar o restringir la oportunidad de acceso al empleo en condiciones de igualdad con otros, también se relaciona con la directriz del *lugar* (D6).

En suma, la vivienda adecuada además de ser un logro valioso (funcionamiento), constituye un producto material que permite la expansión de las libertades (oportunidades) que las personas tienen para hacer o ser lo que tienen razón de valorar, de manera que la vivienda habilita o restringe la consecución del bienestar.

Por lo ya expuesto, en el presente documento se presta especial atención a la existencia de viviendas inadecuadas, como indicador de logros o funcionamientos trancos y de oportunidades restringidas. Esto concuerda con

los argumentos de Velasco [24], quien sugiere que para tener una apropiada perspectiva y estimación de las condiciones de vida de las sociedades es necesario que se incluyan indicadores negativos en su análisis.

Lo anterior, parte de la idea de que la investigación actual en el campo del bienestar social (así como el bienestar subjetivo, felicidad, satisfacción, entre otras), connota una ideología optimista que se enfatiza en el uso de indicadores positivos plagados de falacias. En particular, el autor sostiene que la idea del bienestar social esta “enraizada con la idea falaz de que los indicadores de “progreso” y la mejora constante deben dar cuenta del bienestar de las sociedades, esto conlleva abordarlo a través de una noción menos optimista y más realista en su estudio” [24].

Esto último recobra relevancia al considerar investigaciones [25] que destacan que la información negativa recibe más atención y un procesamiento cognitivo más completo que las positivas; es decir, que la información adversa tiene un impacto significativamente más fuerte que cualquier “buena” información comparable. Además de que muestra la necesidad de un cambio y el camino para lograrlo

De ahí que, la utilización del adjetivo “inadecuado”, para calificar a la vivienda, pretende proporcionar un indicador que estime las condiciones de vida de las comunidades a partir de las carencias y rezagos existentes, como información básica para la toma de decisiones en materia de bienestar. Para lograr este acercamiento, se propone una forma de evaluar la vivienda a escala intraurbana que se basa en las siete directrices del derecho a una vivienda adecuada.

2. Propuesta metodológica: El índice de vivienda inadecuada

² “Un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo es principalmente

Para el índice de vivienda inadecuada (IVINA) que se propone se llevó a cabo la operacionalización de las variables, que consiste en la transformación de conceptos y proposiciones teóricas en variables concretas [26] y abarcó los siguientes pasos:

1. Determinar los conceptos con base en el documento del CDESC [3] sobre el derecho a la vivienda adecuada y desglosarlos en dimensiones, en concordancia con las siete directrices.
2. Transformar las dimensiones de la vivienda adecuada para dar origen a los indicadores temáticos de la vivienda inadecuada (tabla 1).
3. Desglosar las variables en indicadores. Para ello fue necesario revisar qué tan medibles son los indicadores a nivel de áreas geoestadísticas básicas (AGEB²). Por tal motivo, la inasequibilidad no se integró al análisis.
4. Elaborar y calcular el índice sintético o índice compuesto de vivienda inadecuada (IVINA). Este se calculó mediante la superposición de capas de indicadores en un sistema de información geográfica (SIG). Los resultados del IVINA se expresan en porcentajes que van de 0 al 100, donde 0 corresponde a una vivienda adecuada y 100 a una vivienda completamente inadecuada.
5. Agrupar los resultados en intervalos de 20 puntos porcentuales para identificar cinco niveles o grados de inadecuación: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

2.1. El caso de estudio

Para el análisis de la vivienda inadecuada se tomó como caso la ciudad de Mexicali, Baja California, México, ya que sus características geográficas, económicas y demográficas se manifiestan en condiciones distintas de calidad del espacio construido. Esta ciudad se localiza en el noroeste de México y colinda con la ciudad estadounidense de Calexico, California.

habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y solo son asignadas al interior de las localidades urbanas” [27].

A pesar de ser una ciudad joven, el carácter fronterizo de Mexicali, en conjunto con políticas de industrialización, han propiciado un crecimiento demográfico intenso (flujo migratorio permanente nacional e internacional) con una consecuente expansión urbana acelerada. Esto último agrava los problemas urbanos relacionados con la capacidad local de respuesta en materia de dotación de suelo, vivienda, equipamiento e infraestructura [28].

En lo que respecta a la estructura urbana, la forma de la ciudad de Mexicali es semi-radial, donde el centro del semicírculo concuerda con el centro fundacional y la línea internacional, que actúa como una barrera que impide el crecimiento hacia el norte (Estados Unidos). Según Padilla y Juárez [29], el tipo de expansión que propició esta forma, es muy diferente a las ciudades del centro del país, las

que comúnmente siguen una organización concéntrica. Otras diferencias de la ciudad de Mexicali, con respecto al resto de las ciudades de la república, son las condiciones extremas, como altas temperaturas y estar localizada en la zona de más alta sismicidad en México, situaciones que requieren de una tipología constructiva particular para evitar daños y pérdidas en las viviendas por desastres, así como para hacerla un hábitat adecuado para la vida humana.

2.2. Propuesta y cálculo de indicadores temáticos y básicos

En la tabla 1 se presenta la propuesta de indicadores temáticos, los indicadores básicos que los integran y la fuente de información para su cálculo.

Tabla 1. Indicadores temáticos de vivienda inadecuada.

Indicador Temático	Clave	Indicador básico	Fuente	
D1) Inseguridad de tenencia	TITNO	Porcentaje de viviendas (PV) que no cuentan con título de propiedad	[30-31]	
	PROPNO	PV cuyos habitantes consideran como no propia la vivienda	[31]	
D2) Indisponibilidad de servicios	AGUANO	PV que no disponen de agua al interior	[30]	
	LUZNO	PV que no disponen de energía eléctrica		
	DRENNO	PV que no disponen de drenaje		
D3) Inhabitabilidad	VIVFRAG	PV que presentan fragilidad estructural	[32]	
	VIVHA	PV con más de 2.5 habitantes por cuarto (hacinamiento)	[30]	
	ESTMAL	PV cuyos habitantes perciben mal el estado de su vivienda	[31]	
	NORES	PV cuyos habitantes perciben fragilidad estructural		
D4) Gasto no soportable	GASTONO	PV cuyos habitantes consideran su vivienda una carga financiera	[31]	
D5) Inasequibilidad	INASEQ	Porcentaje de población sin oportunidad de adquisición de vivienda	NA*	
	EMPLNO	Porcentaje de personal desocupado por unidad económica		
	SALNO	Porcentaje de viviendas no cubiertas por equipamiento de salud (distancia según normas de equipamientos)		
	EDUNO	PV no cubiertas por equipamiento educativo público (distancia según normas de equipamientos urbanos)		
	AVNO	PV no cubiertas por equipamiento recreativo (distancia según normas de equipamientos)		
D6) Lugar inadecuado	DEPNO	PV no cubiertas por equipamiento deportivo (distancia según normas de equipamientos)	[33-36]	
	ASONO	PV no cubiertas por equipamiento de seguridad social (distancia según normas de equipamientos urbanos)		
	CONTA	Áreas geoestadísticas que presentan contaminación en aire, agua y suelo		[32]
	PELIGGH	PV expuestas a peligros geológicos e hidro-meteorológicos		
	ZONAPER	PV cuyos habitantes perciben la ubicación como poco segura		[31]
7) Inadecuación cultural	NOEXP	PV cuyos habitantes consideran que su vivienda no cumple con sus expectativas ni necesidades	[31]	

Nota: En todos los casos se consideraron únicamente las viviendas particulares habitadas (PV).

*El indicador temático de Inasequibilidad no cuenta con información disponible para poder calcularlo a nivel intraurbano.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a la diferente naturaleza de los indicadores planteados, se optó por separarlos en dos grupos temáticos (tabla 2): por un lado, los indicadores que describen las condiciones materiales de la vivienda y su entorno, de naturaleza agregativa. Por el otro lado, los indicadores que describen condiciones de percepción y de seguridad, que afectan de manera directa las *condiciones de permanencia* en la vivienda. Estos últimos se trabajaron como ponderadores.

Tabla 2. División de indicadores temáticos por grupos temáticos.

Grupo	Indicador temático	Descriptor
Condiciones materiales (vivienda y entorno) CM		
Indisponibilidad de servicios	NOSERV	PV que no disponen de servicios (agua, electricidad y drenaje).
Inhabitabilidad (INHABIT)	INHA	PV que presentan fragilidad en los materiales y procesos constructivos, además de hacinamiento.
	PINABIT	PV cuyos habitantes las perciben en mal estado y como no resistentes.
Lugar inadecuado	INACC	PV sin cobertura de equipamientos urbanos y sin fuentes de trabajo próximas, además de ubicarse en áreas contaminadas.
	NEXPO	PV en áreas expuestas a peligros naturales (geológicos e hidrometeorológicos)
Condiciones de permanencia		
Inseguridad de tenencia y gasto no soportable	PSEG	PV que no cuentan con seguridad jurídica de la tenencia y que son consideradas una carga financiera.
Insatisfacción	PINSA	PV donde los habitantes se encuentran insatisfechos con ellas.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque la inadecuación cultural de la vivienda es un tema complejo, para hacerlo medible, se tomó como indicador la insatisfacción con la vivienda. Esta consideración parte de la definición de Amérigo [37] de satisfacción residencial, "un estado afectivo de carácter

positivo que el individuo posee hacia su ambiente residencial y que le llevará a desarrollar determinadas conductas destinadas a mantener o elevar la congruencia con el mismo". De manera que, para propósitos del artículo, se considera que dentro de las conductas destinadas a mantener o elevar la valoración positiva de la vivienda se incluye la apropiada expresión de la identidad cultural. Por lo anterior, la insatisfacción con la vivienda ocurre al manifestarse un estado de afecto negativo o descontento por parte del habitante hacia su residencia u entorno, situación que le puede llevar a desarrollar conductas, que van desde la falta de mantenimiento hasta el desalojo del inmueble.

La ecuación 1 muestra el cálculo general del índice de vivienda inadecuada (*IVINA*), donde se promedian las *condiciones materiales* (NO_{SERV} , IN_{HABIT} , IN_{ACC} y N_{EXPO}) y se multiplican por los indicadores de las *condiciones de permanencia* (P_{SEG} y P_{INSA}).

$$IVINA = \left(\frac{NO_{SERV} + IN_{HABIT} + IN_{ACC} + N_{EXPO}}{4} \right) P_{SEG} * P_{INSA} \tag{1}$$

El indicador temático IN_{HABIT} (ecuación 2) resulta de la multiplicación de la inhabitabilidad (IN_{HA}) por la inhabitabilidad percibida (P_{INABIT}).

$$IN_{HABIT} = IN_{HA} * P_{INABIT} \tag{2}$$

El indicador P_{INABIT} (ecuación 3) se obtiene mediante la división de la suma de los indicadores de percepción de estado ($ESMAL$) y fragilidad ($NORES$), entre la cantidad máxima que puede tomar tal adición (en este caso 200%). Además, se le suma la unidad para que el indicador agregue valor al indicador temático IN_{HABIT} .

$$P_{INABIT} = \frac{(ESTMAL + NORES)}{200} + 1 \tag{3}$$

El indicador temático IN_{ACC} (ecuación 4) promedia la inaccesibilidad de la vivienda a fuentes de empleo ($EMPL_{NO}$); salud pública (SAL_{NO}); educación básica (EDU_{NO});

recreación (AV_{NO}); deporte (DEP_{NO}); asistencia social (ASO_{NO}); y ambientes libres de contaminación (CONTA).

$$IN_{ACC} = \frac{\left(\frac{EMPL_{NO} + SAL_{NO} + EDU_{NO} + AV_{NO} + DEP_{NO} + ASO_{NO} + CONTA}{7} \right)}{7} \quad (4)$$

El indicador de N_{EXPO} (ecuación 5) registra el nivel de exposición de la vivienda a amenazas naturales a partir de la multiplicación del peligro latente (PELIG_{GH}) por el percibido por los habitantes (ZONA_{PER}). Este último se utiliza como ponderador de la exposición latente, por lo que se obtiene al dividir el nivel de percepción de inseguridad entre la cantidad máxima que puede alcanzar el indicador (100%).

$$N_{EXPO} = PELIG_{GH} * \left[\left(\frac{ZONA_{PER}}{100} \right) + 1 \right] \quad (5)$$

Con respecto a los ponderadores que participan en la ecuación 1, el de seguridad en tenencia y carga financiera o P_{SEG} (ecuación 6) se obtuvo a partir de sumar los indicadores de falta de título (TIT_{NO}), la vivienda no propia (PROP_{NO}) y la vivienda considerada carga financiera (GASTO_{NO}). Además, el resultado se divide entre la suma de las cantidades máximas que se pueden alcanzar en aquellos (300%). A diferencia de los demás, al ponderar P_{SEG} no se le suma la unidad, ya que los ingresos de los habitantes de una vivienda y los derechos de propiedad de la misma pueden disminuir o incrementar su inadecuación de manera directa.

$$P_{SEG} = \frac{TIT_{NO} + PROP_{NO} + GASTO_{NO}}{300} \quad (6)$$

Por su parte, el ponderador de insatisfacción con la vivienda o P_{INSA} (ecuación 7) es el resultado de dividir el indicador de insatisfacción de los habitantes con la vivienda (NOEXP) entre el máximo alcanzable para dicho indicador (100%).

$$P_{INSA} = \left(\frac{NOEXP}{100} \right) + 1 \quad (7)$$

3. Resultados

En la tabla 3 se presentan los resultados de los indicadores temáticos³ de INHABIT, INACC y NEXPO, así como el grupo de condiciones materiales (vivienda y entorno) que se produce al promediar los tres indicadores.

Tabla 3. Resultados del grupo condiciones materiales por vivienda en porcentajes.

Indicador	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
INHABIT (Inhabitabilidad)	0.1	15.5	24.8	23.7	36
INACC (Lugar inadecuado)	0.0	17.5	39.1	40.2	3.2
NEXPO (Lugar inadecuado)	0.0	0.0	2.3	48.3	49.4
Condiciones materiales (vivienda y entorno)	0.0	0.0	25.5	56.0	18.5

Fuente: Elaboración propia.

En el indicador IN_{HABIT}, se observa que casi 60% del total de viviendas en la ciudad de Mexicali presentan nivel alto y muy alto de inhabitabilidad, situación que se debe en gran medida a la fragilidad constructiva, al hacinamiento y a la imposibilidad de los habitantes de percibirlos. Por su parte, el indicador de IN_{ACC} señala que 43.4% de las viviendas están ubicadas de manera inadecuada (niveles alto y muy alto); es decir, que casi la mitad de las viviendas no se encuentran próximas a equipamientos urbanos ni fuentes de empleo, además se ubican en áreas contaminadas. En cuanto al indicador temático N_{EXPO}, se observa que casi el total de la vivienda en la ciudad de Mexicali presenta niveles altos y muy altos de exposición a peligros geológicos e hidro-meteorológicos, resultado que se explica en gran medida por la ubicación de la ciudad en la zona de más alta sismicidad en México.

³ Debido a la cobertura casi total de los servicios básicos (agua, electricidad y drenaje) en la mancha urbana de Mexicali, se excluyó el indicador temático NO_{SERV} del

cálculo del IVINA, ya que solo se consideran condiciones negativas.

El grupo temático de condiciones materiales (que promedia a IN_{HABIT} , IN_{ACC} y N_{EXPO}) revela, por un lado, que la mayoría de las viviendas en la ciudad (74.5%) tienen niveles de inadecuación alto y muy alto. Por el otro lado, el 25.5% restante se encuentra en el nivel medio, lo que significa que todo el parque habitacional de Mexicali mantiene características (ya sean físicas o de localización) que impiden la consecución de la vivienda adecuada.

Adicionalmente, la figura 1 muestra el mapa temático del grupo de condiciones materiales, donde se observa la distribución intraurbana heterogénea de las viviendas.



Figura 1. Condiciones materiales (vivienda y entorno). Fuente: Elaboración propia.

En la figura 1 se aprecia que las AGEB con niveles muy altos de inadecuación se ubican principalmente en las zonas periféricas del poniente y sur de la ciudad. Estas zonas se constituyen por fraccionamientos de tipo popular (producto del acceso a suelo urbano por vía de la invasión), los poblados agrícolas que quedaron atrapados por el crecimiento urbano y los fraccionamientos de tipo progresivo) promovidos por el Gobierno del Estado. Estos últimos hacen evidente que la inhabitabilidad y el lugar inadecuado, puede ser promovidos por el gobierno al implementar programas que abordan parcialmente el tema de la vivienda, ya que se enfocan en la regularización de lotes o a dar acceso a un pie de casa, sin que exista una propuesta que garantice que ese primer esfuerzo se convertirá en una vivienda adecuada.

Por otra parte, los AGEB con nivel medio de inadecuación corresponden a la zona central y este de la ciudad, donde se concentran los

equipamientos urbanos, además de fraccionamientos de tipo residencial. Sin embargo, el peligro geológico e hidrometeorológico latente en Mexicali, en conjunto con sistemas constructivos deficientes, incrementa la inadecuación de la vivienda en toda la ciudad.

En la tabla 4 se puede apreciar cómo disminuyen considerablemente los niveles de inadecuación del grupo de condiciones materiales (CM) al multiplicarlo por los ponderadores de inseguridad e insatisfacción.

Ya que pasa de 74.5% de las viviendas en niveles alto y muy alto de inadecuación a 82.2% con niveles bajo y muy bajo. Esto sucede porque gran parte de los habitantes de Mexicali son propietarios de sus viviendas y, por tal motivo, consideran que esta no representa una carga financiera, lo que vuelve tolerables las condiciones materiales inadecuadas.

Tabla 4. Resultados de los grupos temáticos e índice sintético por vivienda en porcentajes.

Indicador	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Condiciones materiales (vivienda y entorno) / CM	0.0	0.0	25.5	56.0	18.5
Condiciones materiales y seguridad	31.4	50.8	17.8	0.0	0
IVINA índice de vivienda inadecuada	24.3	42.2	29.9	3.6	0

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4 también se observan los resultados del índice de vivienda inadecuada. El IVINA muestra que un 3.6% de las viviendas de Mexicali (10,085 de un total de 249,041) presentan un nivel alto de inadecuación, situación que se acentuó por la insatisfacción reportada por los habitantes. Por su parte, 66.5% de las viviendas se encuentra en los niveles bajo y muy bajo de inadecuación.

Con respecto a la distribución espacial de las viviendas inadecuadas, la figura 2 muestra el mapa temático del IVINA, donde se observa que la vivienda inadecuada se localiza en la

periferia oeste y sureste de la urbe, situación que puede ser resultado del crecimiento acelerado de la ciudad que rebasó la capacidad local de dotación de suelo, vivienda, equipamiento, empleo e infraestructura [29]. Por su parte, la vivienda adecuada se posiciona en el centro (acumulación de equipamiento) y noreste (zonas residenciales).

Cabe subrayar que, el cambio que provocan los ponderadores de *seguridad e insatisfacción* en el índice final, revela la importancia que tiene la seguridad jurídica de la tenencia y la localización de la vivienda. Esto puede justificarse con la noción de que ser el propietario de una vivienda es un logro considerado valioso que genera satisfacción y sostiene otros funcionamientos; mientras que rentarla o tener posesión ilegal de esta puede traer consigo sentimientos negativos y preocupación, que eventualmente pondrían en conflicto las situaciones o condiciones propias de vida.

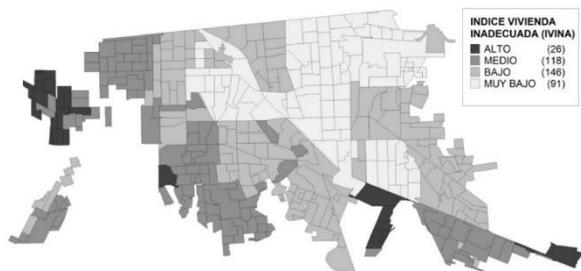


Figura 2. Índice de vivienda inadecuada (IVINA). Fuente: Elaboración propia.

En otras palabras, los habitantes pueden ver reflejado en sus viviendas el progreso, el cúmulo de esfuerzos invertidos en su consecución (habilidades, medios y oportunidades), pues la forma en que se hicieron de ella supone el sorteo de ciertas limitantes (personales, sociales o ambientales), como pueden serlo la acumulación de capital económico o la obtención de un empleo remunerado para la compra de una vivienda, ya que en un país como México, el derecho a la vivienda se adquiere principalmente por medio del trabajo. De modo, que la satisfacción que propicia habitar una vivienda inadecuada puede ser producto de varios factores, entre ellos, el no tener la oportunidad de elegir (libertad) una

mejor, pues la vivienda inadecuada suele presentarse como la única opción viable para las familias de bajos recursos; pero también, como reflejo de la transformación de las condiciones de vida que se generan a partir del hecho de migrar a Mexicali.

4. Conclusiones

La vivienda adecuada simboliza tanto el cumplimiento de un derecho, como parte de la habilitación de las capacidades humanas centrales. Pues, la vivienda propicia una vasta gama de oportunidades serias (p. ej. de protección, de buena salud, de privacidad, de seguridad, de lugar de estudio), siempre y cuando, sea asequible, habitable y culturalmente apropiada; además de contar con costos accesibles, seguridad jurídica, servicios básicos y buena localización.

Desde esta lógica, se propuso el indicador sintético *IVINA* que evalúa el hábitat como un elemento del bienestar desde el enfoque de las capacidades. Pues se entiende que el cumplimiento parcial de las condiciones señaladas en el párrafo anterior, pueden reducir o inhabilitar la expansión de las libertades de los habitantes y, por lo tanto, participar en el detrimento de su bienestar. Pero, a diferencia de otros indicadores que se aplican a escala nacional, este trabajo permitió detectar diferencias al interior de la ciudad, como información básica para la planeación y la atención de las desigualdades estructurales.

Una vez aplicado al caso de estudio, el índice y los grupos temáticos permitieron identificar que más de la mitad de las viviendas en Mexicali son inadecuadas porque no cuentan con condiciones materiales apropiadas; es decir, son frágiles, no tienen espacios suficientes y están expuestas tanto a peligros naturales, como a contaminación ambiental. Además de que carecen de acceso a equipamiento y fuentes de empleo.

Por lo anterior, entre las aportaciones que hace el artículo al campo del conocimiento, se encuentra la propuesta metodológica que

presenta y pone a prueba en un caso concreto. Esta permite identificar desigualdades el interior de las ciudades y centrar la atención en las áreas más desfavorecidas en materia de vivienda, tanto en condiciones materiales como en la distribución de oportunidades. Lo anterior como una aproximación multidimensional al cumplimiento del derecho humano a una vivienda adecuada

Ahora bien, al revisar diferentes baterías de indicadores e índices [6-15], que miden distintos aspectos de la vivienda, nos percatamos de características predominantes en cada una de ellas, estas son: 1) uso de las directrices del derecho a una vivienda adecuada; 2) uso de información de fuentes oficiales, anuales y gratuitas; 3) simplicidad del cálculo; 4) uso de ponderadores; 5) uso de la escala intraurbana; 6) resultados en porcentajes y promedios; 7) uso de sistemas de información geográfica; 8) compilación de los indicadores; 9) valoración en escalas; y 10) visualización en mapas temáticos. Cabe resaltar, que las propuestas de indicadores revisadas comparten varias de las características anteriores; en cambio, solo la presente investigación integra las diez.

Sin embargo, el estudio de las condiciones del hábitat a nivel intraurbano presenta algunas limitantes, la principal es la falta de disponibilidad de información para integrar el total de indicadores básicos que permitan una visión más integral del tema.

Aun así, los indicadores generados son directamente vinculables con la formulación de políticas e instrumentación de estrategias con la finalidad de incrementar el bienestar de la población urbana. También constituyen una herramienta básica para el monitoreo de los cambios en las condiciones de habitabilidad de la ciudad; es decir, son útiles para diagnosticar, planificar y vigilar la cobertura del equipamiento urbano, la distribución de las fuentes de empleo, la localización segura de los hogares, entre otros aspectos.

De modo que académicos, planificadores y tomadores de decisiones puedan generar información útil para orientar planes y acciones urbanas hacia el logro del desarrollo sustentable, donde la consecución del derecho a una vivienda adecuada es un requisito obligado.

Como asignatura pendiente, queda desarrollar un indicador más robusto de inadecuación cultural, que permita conocer aspectos identitarios relacionados con la vivienda. Además, es importante conectar el análisis del hábitat con la orientación de las acciones gubernamentales en la materia, así como dar seguimiento a los cambios que experimenta la ciudad con el paso del tiempo, además de comparar su desempeño con otras ciudades similares.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas (ONU), (2017, Jan. 25). *Septuagésimo primer período de sesiones, Nueva agenda urbana. Resolución aprobada por la Asamblea General el 23 de diciembre de 2016*. [online]. <https://undocs.org/es/A/RES/71/256>
- [2] Organización de las Naciones Unidas (2015, Sep. 18). *Septuagésimo período de sesiones, Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. [online]. <https://undocs.org/es/A/70/L.1>
- [3] Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos. (1991, Dic. 13). *Sexto periodo de sesiones, El derecho a una vivienda adecuada (Art.11, párr. 1) CESCR Observación general N° 4 (General Comments)*. [online]. <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2005/3594.pdf>
- [4] Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol) y ONU-Hábitat México, *Estudio de indicadores ONU-HÁBITAT para los observatorios urbanos locales de las ciudades mexicanas*. México: Sedesol, 2004.
- [5] UN-HABITAT, *A guide to setting up an urban observatory, guidebook*. Nairobi, Kenya: UN-HABITAT, 2020. https://unhabitat.org/sites/default/files/2020/06/urban_observatory_guide.pdf
- [6] Habitat for Humanity Sri Lanka, *Defining indicator to measure adequate housing in Sri Lanka* 2009. Sri Lanka: Habitat for humanity Sri Lanka, 2009.
- [7] N. F. López-Murcia, "El derecho de una vivienda adecuada: Propuesta sobre cómo medir el cumplimiento del aspecto "lugar",” *Int. Law: Rev. Colomb. Derecho Int. Bogotá (Colombia)*, no.21, pp. 393-431, 2012. <http://www.scielo.org.co/pdf/ilrdi/n21/n21a12.pdf>
- [8] M. Haffner, C. Lennartz, and K. Dol, *Measuring housing system performance: Is a composite indicator a*

useful instrument? (Working paper). Países Bajos: OTB Research Institute for the Built Environment, 2012. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.938.1017&rep=rep1&type=pdf>

[9] La Defensoría del Pueblo Colombia, *El derecho a una vivienda digna y adecuada. Evaluación de las condiciones del componente LUGAR en proyectos de vivienda de interés social (vis) y viviendas de interés prioritario (vip) en la ciudad de Bogotá*. Bogotá, Colombia: La Defensoría del Pueblo Colombia, 2012. <http://www.defensoria.org.co/red/anexos/publicaciones/viviendaDigna.pdf>

[10] A. Ranfla, J. Batiz, and L. Cisneros, *Reporte de los indicadores de Vivienda del Municipio de Mexicali, Baja California*. México: Observatorio Urbano Local de Mexicali, UABC, 2014. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4649.0004>

[11] N. F. López-Murcia, *¿Cómo medir el derecho a una vivienda adecuada en su aspecto lugar? Evolución del aspecto en el Urbanismo, aplicabilidad del derecho y posibilidad de medición (Tesis de Maestría)*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63430>

[12] Programa de Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Habitat), *Índice de las ciudades prósperas en la república mexicana City Prosperity Index, CPI, reporte nacional de tendencias de la prosperidad urbana en México*. México: ONU-Habitat, 2016. <https://infonavit.janium.net/janium/Documentos/58793.pdf>

[13] E. Actis Di pascale, “Medición de las condiciones habitacionales: una propuesta metodológica para analizar desigualdades inter e intra-territorios urbanos”, *Cuad. de Viv. y Urb.*, vol. 10, no. 20, pp. 46-67, 2017. <http://nulan.mdp.edu.ar/2771/1/actis-2017.pdf>

[14] H. Selebalo, and D. Webster, *Monitoring the Right of Access to Adequate Housing in South Africa*. Sudafrica: SPII, 2017. http://spii.org.za/wp-content/uploads/2018/02/Right-to-Housing_2017.pdf

[15] S. Mohammadpour, and T. Reza, “Spatial Analysis of Housing Indicators for Informal Settlements (Case Study, Informal Settlements in Tabriz Metropolis, 1996 and 2016)”, *Journal of Geography and Spatial Justice*, vol.1, no. 2, pp. 116-127, 2018. http://gsj.uma.ac.ir/article_674_4b4c1101e727b25562c0aa6dbb16cbcc.pdf

[16] M. Nussbaum, *Women and Human Development: The Capabilities Approach*. Inglaterra: Cambridge University Press, 2000. https://genderbudgeting.files.wordpress.com/2012/12/nussbaum_women_capabilityapproach2000.pdf

[17] A. Sen, “Equality of What?,” in *Tanner Lectures on Human Values*. Inglaterra, Cambridge University Press, 1979. https://www.ophi.org.uk/wp-content/uploads/Sen-1979_Equality-of-What.pdf

[18] S. Alkire, “Capability Approach and Well-being Measurement for Public Policy,” in M. D. Adler and M. Fleurbaey (eds.), *The Oxford Handbook of Well-Being*

and Public Policy: Oxford University Press, capítulo 21, 2015.

<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199325818.013.18>

[19] P. Nygren, “Re-examining the Capability Approach: the significance of situated personal action competences” in *HDCA Conference Capability and Diversity in a Global Society*, Tokyo, 2016.

<https://www.semanticscholar.org/paper/Re-examining-the-Capability-Approach-%3A-the-of-Nygren/7efd9eacbb8845714c8a15e09a8d01117de2b1a4>

[20] A. Sen, *Inequality Reexamined*. Inglaterra: Clarendon Press, 1992.

<https://doi.org/10.1093/0198289286.001.0001>

[21] D. Coates, P. Anand, and M. Norris, “Housing, Happiness and Capabilities: A Summary of the International Evidence and Models”, *Open Discussion Papers in Economics*, no. 81, 2015. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/147532/1/857485571.pdf>

[22] F. Oswald, H. Wahl, H. Mollenkopf, and O. Schilling, “Housing and Life Satisfaction of Older Adults in Two Rural Regions in Germany”, *Research on Aging*, vol. 25, no.2, pp. 122-143, 2003. <https://doi.org/10.1177/0164027502250016>

[23] P. Malpass, *Housing and the Welfare State*. Reino Unido: Palgrave Macmillan, 2005. <https://doi.org/10.1017/S0047279406270545>

[24] F. J. Velasco, “El malestar social: integración de indicadores negativos que expliquen el contexto del bienestar social de los mexicanos”. *Revista Electrónica de Psicología Política*, vol. 16, no 40, pp. 24-44, 2018. <http://www.psicopol.unsl.edu.ar/>

[25] R. F. Baumeister, E. Bratslavsky, C. Finkenauer, y K. D. Vohs, “Bad is stronger than good”, *Review of general psychology*, vol. 5, no. 4, pp. 323-370, 2001. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.5.4.323>

[26] M. Reguant, and F. Martínez, *Operacionalización de conceptos/ variables*. Barcelona: Deposito Digital de la UB, 2014. <http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/57883/1/Indicadores-Repositorio.pdf>

[27] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Censos y conteos de población y vivienda*. México: INEGI, 2018.

[28] J. Ley, “Vivienda frágil ante sismos. La acción habitacional en la ciudad de Mexicali”, in *Procesos urbanos en Baja California: análisis, planeación y sustentabilidad*. México, Mexicali: RNIU-UABC, pp.109-136, 2012. https://www.researchgate.net/publication/264275680_Vivienda_fragil_ante_sismos_La_accion_habitacional_en_la_ciudad_de_Mexicali

[29] L. Padilla, and M. Juárez, “La dimensión espacial del crecimiento poblacional de Mexicali”. *Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM*, no.43, pp. 88-104, 2000. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n43/n43a7.pdf>

[30] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Censo de Población y Vivienda 2010 [Cartografía censal urbana]*. México: INEGI, 2010.

[31] Universidad Autónoma de Baja California (UABC), *Percepción local de peligros: ciudad de Mexicali [Cuestionario]*. México: Inédito, 2016.

[32] Universidad Autónoma de Baja California, Ayuntamiento de Mexicali y Secretaría de Desarrollo Social (UABC, AM y Sedesol), *Atlas de riesgos del municipio de Mexicali. Actualización 2011*. México: Inédito, 2011.

[33] INEGI, *Directorio estadístico nacional de unidades económicas (DENUE) 2009 [Base de datos]*. México: INEGI, 2009.

[34] Sedesol, *Sistema normativo de equipamiento urbano. Tomo I. Educación y cultura*. México: Sedesol, 1999.

[35] Sedesol, *Sistema normativo de equipamiento urbano. Tomo II. Salud y asistencia social*. México: Sedesol, 1999.

[36] Sedesol, *Sistema normativo de equipamiento urbano. Tomo V. Recreación y deporte*. México: Sedesol, 1999.

[37] M. Amérigo, *Satisfacción residencial. Una aproximación psicosocial a los estudios de calidad de vida*. España: Universidad Complutense de Madrid, 1990. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=142015>



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](#)



Estudio del paisaje del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre. Un sitio Ramsar dentro de una ciudad desértica del Noroeste de México

Landscape study of the Mexico-Xochimilco-Campestre lagoon system. A wetland Ramsar site within a desert city in Northwest Mexico

Mariana Jácome Ibarra ¹, Osvaldo Leyva Camacho ², Gonzalo de la Fuente de Val 

¹Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera, Mexicali-San Felipe Km 3.5, Laguna Campestre, Mexicali, Baja California, México

²Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Boulevard Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, Baja California, México

³Fondo Verde ONG, Calle Santa Lucía 305, Urb. San Antonio, Huancayo, Junín, Perú.

⁴Instituto Superior de Medio Ambiente (ISM), Calle de Núñez de Balboa, 120, 28006 Madrid, España

Autor de correspondencia: Mariana Jácome Ibarra, Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera, Mexicali-San Felipe Km 3.5, Laguna Campestre, Mexicali, Baja California, México. E-mail: mariana.jacome@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0001-6101-9010.

Recibido: 23 de Octubre del 2021

Aceptado: 31 de Diciembre del 2021

Publicado: 24 de Enero del 2022

Resumen. - *El sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre forma parte del Sistema de Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado, considerados humedales imprescindibles para el mantenimiento hídrico de una ciudad desértica como Mexicali. Sin embargo, este sistema lagunar ha sido ignorado en la planeación urbana de la ciudad. A través de la metodología de análisis del paisaje se obtuvieron tres unidades de paisaje: sistema lagunar, área agrícola y periferia urbana. El área de la periferia urbana obtuvo el menor valor de calidad visual, mientras que el sistema lagunar obtuvo el valor mayor. El análisis FODA indica la existencia de unidades de paisaje atractivas y con potencial eco-turístico y de conservación, pero las restricciones normativas y el desconocimiento por parte de la población complican su manejo y apropiación de estas unidades de paisaje. Los resultados de la encuesta muestran que la población con mayor tiempo de residencia en la ciudad tiene mayor conocimiento de las lagunas existentes, así como también es la más proactiva en las propuestas de mejoramiento del paisaje del sistema lagunar. La información generada se usará para el diseño del manejo de cauces y de actividades eco-turísticas, así como la propuesta de actividades socioculturales y de educación ambiental para que la población se apropie y ayude en la conservación y protección de este sistema de humedales.*

Palabras clave: Humedales en zonas áridas; Estudio del paisaje; Manejo urbano de humedales.

Abstract. - *The Mexico-Xochimilco-Campestre lagoon system is part of the System of Remnant Wetlands of the Colorado River Delta, considered essential wetlands for the water maintenance of a desert city like Mexicali. However, this lagoon system has been ignored in the urban planning of the city. Through the landscape analysis methodology, three landscape units were obtained: a lagoon system, an agricultural area, and an urban periphery. The urban periphery area obtained the lowest value for visual quality, while the lagoon system obtained the highest value. The SWOT analysis indicates the existence of attractive landscape units with eco-tourism and conservation potential, but regulatory restrictions and ignorance on the part of the population complicate their management and appropriation of these landscape units. The results of the survey show that the population with the longest residence time in the city has the greatest knowledge of the existing lagoons, as well as being the most proactive in the improvement proposals for the landscape of the lagoon system. The information generated will be used for the design of channel management and eco-tourism activities, as well as the proposal of socio-cultural activities and environmental education for the population to appropriate and help in the conservation and protection of this wetlands system.*

Keywords: Wetlands in arid zones; Landscape study; Urban management of wetlands.



1. Introducción

Los humedales son ecosistemas altamente productivos al ser albergue de una gran diversidad biológica; además de representar las mayores fuentes de agua, nutrientes y alimento de las que no sólo depende el hombre y sus comunidades, sino también incontables especies tanto vegetales como animales [1]. Según la Convención Ramsar, un humedal es “*toda área terrestre inundada o saturada de agua de manera estacional o permanente*” [2]; que proveen innumerables servicios ambientales tales como regulación y protección contra inundaciones y huracanes, recarga de mantos acuíferos, mejoramiento de la calidad del agua, prevención de la erosión y deslaves, regulación del clima y almacenamiento de carbono, entre otros servicios [3] [4].

Sin embargo, hoy en día existe una reducción del 64% en la superficie total de los humedales existentes en el planeta, con una mayor tasa de pérdida en humedales continentales que en los costeros [5]. Situación aún más crítica para los humedales localizados en zonas áridas y semiáridas del mundo. Entre las principales causas de su reducción están el cambio en el uso de suelo para incrementar la superficie de las ciudades y los campos agrícolas, la sobreexplotación de recursos hídricos y el incremento en el desarrollo de infraestructuras urbanas [4] [6].

Una de las herramientas para evaluar las modificaciones ambientales que suceden en los ecosistemas son los estudios de paisaje, ya que permiten entender cómo cambia el territorio en el tiempo y en el espacio [7] [8]. Se trata por lo tanto, de instrumentos que incorporan los aspectos paisajísticos a la planeación territorial y urbana [7].

A nivel mundial los estudios de paisaje en humedales se han centrado en la cuantificación del cambio en la cobertura de suelo [9] [10], la evaluación de la utilidad del humedal como albergue de vida silvestre [11], la evaluación del riesgo y la vulnerabilidad en el tiempo [12], la elección de los mejores indicadores de cambio en el paisaje de los humedales [13], la relación entre los factores de impacto y las tasas de cambio [14] y la cuantificación de los cambios tanto espaciales como temporales usando sensores remotos [9] [15] [16]. En estos trabajos se trata de entender el efecto que tienen los cambios paisajísticos sobre la biodiversidad, los procesos ecológicos y la función de estos ecosistemas.

En Latinoamérica los estudios de paisaje se han enfocado en realizar revisiones bibliográficas del marco conceptual y metodológico para el estudio de los paisajes de humedales desde el enfoque de la Geo-Ecología [17], identificar los humedales urbanos como ecosistemas estratégicos en la estructura y función del paisaje aledaño [18], clasificar los humedales usando un enfoque paisajístico basado en Sistemas de Información Geográfica [19], y por último, en evaluar el paisaje visual empleando la fragilidad y la capacidad de uso del humedal [20]. Con ayuda de esta información básica es posible iniciar con el diseño de planes de ordenamiento territorial que permitan conservar estos ecosistemas.

En México los estudios de paisaje se han orientado principalmente en los cambios de uso de suelo, la distribución espacial de las especies y la fragmentación del paisaje, tanto de las selvas como de los bosques húmedos [7] [21]. Sin embargo, existen pocos estudios en humedales de zonas áridas [7], donde el impacto de los cambios en el paisaje es diferente que en los ambientes tropicales, ya que depende de las características bióticas y abióticas de cada zona. Es en este sentido que el presente trabajo se enfocó en



aplicar una adaptación de la metodología de los estudios del paisaje usada en la Comunitat Valenciana [22] en el Sistema Lagunar México-Xochimilco-Campestre, un sitio Ramsar localizado en la ciudad de Mexicali, con el fin que éste sea contemplado en la planeación territorial de la ciudad.

1.1 Zona de estudio

El municipio de Mexicali presenta un clima seco, desértico, árido, cálido y muy extremo, con una baja precipitación pluvial características típicas del desierto Sonorense [23] [24]. No obstante, en él están ubicados dos humedales importantes registrados como sitios Ramsar: los “Humedales del Delta del Río Colorado” (sitio No. 814) y los “Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado” (sitio No. 1822) [3].

Los Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado forman un sistema que sigue las líneas de acumulación natural de agua en la zona que originalmente cubría el delta. Sin embargo, las zonas del cauce y del delta del río han sufrido una enorme transformación debido a los procesos de urbanización y al establecimiento del valle agrícola de Mexicali [25]. A estos cambios se suma la baja precipitación pluvial de la región que tiene promedios anuales de 132mm [23] [24]. Por lo que algunos de los humedales pertenecientes al Sistema de Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado (SHRDRC) actualmente se encuentran aislados y pueden ser considerados pequeños satélites individuales asociados con áreas mayores que forman el sistema de humedales [26]. Como es el caso del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre.

El sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre se localiza en la parte sur de la ciudad de Mexicali. (Figura 1). Se integra al subsistema hídrico del Río Nuevo que actualmente funciona

como un dren agrícola de aguas de descarga del Distrito de Riego 014, además de captar agua pluvial [27], [28]. Originalmente este subsistema hídrico era utilizado por el Río Colorado durante sus grandes crecidas para dar salida a su caudal hacia Salton Sea en California, EU [29], [30].



Figura 1. Localización del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre Fuente: Elaboración propia. Con base en ArcGis 10.2.

El sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre en la actualidad no presenta un modelo típico en su morfología, dado que las terrazas que normalmente aparecen en los procesos fluviales no aparecen aquí debido al poco caudal, por lo que las tasas de sedimentación y erosión no tienen un efecto significativo en el cauce principal; por ende, se forman pequeños cantiles que acumulan sedimento, lo que propicia el asentamiento de vegetación asociada como plantas xerófitas y halófitas, así como la formación de zonas húmedas [27], donde muchas especies animales, principalmente aves, utilizan como zonas de descanso, alimentación y anidación.

No obstante que el sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre forma parte del SHRDRC, la zona sur de la ciudad donde se ubica presenta el mayor crecimiento urbano desde 1990. Algunos de los nuevos fraccionamientos se habitaron en un período de tan solo siete años a una tasa de crecimiento



anual del 61%. La tendencia tuvo como resultado la incorporación al desarrollo urbano de una mayor superficie a la proyectada, generando la expansión urbana en esa zona de la ciudad y por lo tanto, la reducción de las áreas de inundación del sistema lagunar [31] (Figura 2). Es por esto que se hace imprescindible considerar al sistema lagunar en la planeación urbana de la ciudad, no solo por ser albergue de una gran biodiversidad, sino por representar una fuente de agua necesaria para el mantenimiento hídrico de una ciudad desértica como Mexicali.

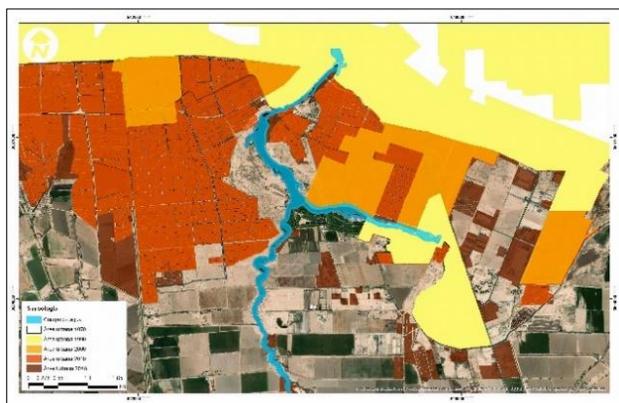


Figura 2. Crecimiento de la mancha urbana de Mexicali alrededor del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre, desde 1970 hasta 2018. Fuente: Elaboración propia. Con base en ArcGis 10.2

2. Metodología

Se utilizó una adaptación de la metodología empleada por la Generalitat Valenciana [22], para el sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre, ya que permite valorar los paisajes relevantes con el fin de definir las medidas de protección, gestión y ordenación para preservar estos humedales. Las fases de la metodología se muestran en la siguiente figura (Figura 3):

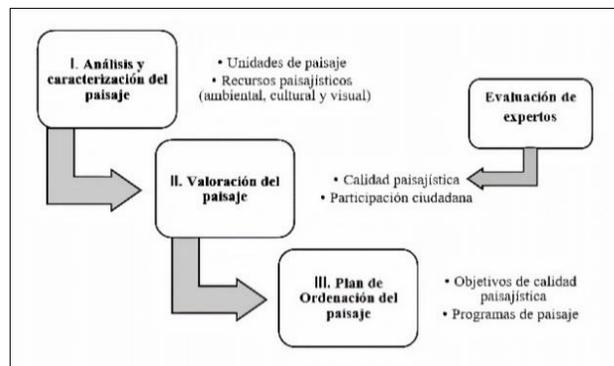


Figura 3. Fases de la metodología aplicada. Fuente: Elaboración propia. Con base en: [22], [32].

En la Fase I. Análisis y caracterización del paisaje, se establecieron las unidades de paisaje usando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para lo cual se realizó un procedimiento de tratamiento de imagen utilizando ArcGis 10.2, a partir de una imagen LandSat en falso color de la zona de estudio y posteriormente se hizo una clasificación supervisada para delimitar las unidades de paisaje como se presenta en la figura 4. Posteriormente se describieron las unidades de paisaje y finalmente se caracterizaron usando las cualidades del territorio (agua, suelo y vegetación), los recursos paisajísticos ambientales, culturales y visuales, así como los elementos que degradan el paisaje.

En la Fase II. Valoración del paisaje, se evaluó la calidad paisajística de las unidades de paisaje a través de expertos provenientes tanto de la academia como de organizaciones ambientales, que han trabajado e investigado aspectos ecológicos así como las dinámicas sociales que se desarrollan en torno al sistema lagunar. En esta fase se realizaron el análisis FODA y la Matriz de Posición Estratégica y Evaluación de Acción (MPEEA) que permitieron valorar las estrategias de acción producidas en el mismo FODA. También se evaluó la calidad visual de las unidades de paisaje utilizando la metodología BLM (Bureau of Land Management 1980). Se trata de un método indirecto de evaluación de las características visuales básicas de los



componentes del paisaje. Se le asigna un valor a cada componente según los criterios de valoración [33]. Por último, se aplicó una encuesta para conocer la opinión de 114 ciudadanos sobre la calidad visual de las unidades de paisaje; para lo cual se consideró una población de 814,668 habitantes de la ciudad de Mexicali mayores de 18 años, según datos del último censo de 2020 [34].

Se usó la siguiente fórmula para calcular el tamaño mínimo de muestra para una población conocida (1):

$$n = \frac{(N * Z^2 * p * q)}{(N - 1) * e^2 + p * q} \quad (1)$$

Donde:

N = población 814,668.

Z = 1.96 para un nivel de confianza del 95%.

p = 0.92 proporción de personas que dijeron conocer las lagunas (encuesta previa).

q = 0.08 proporción de personas que dijeron no conocer las lagunas (encuesta previa).

e = 0.05 error muestral.

En la Fase III. Plan de Ordenación del paisaje, se establecieron los objetivos de la calidad paisajística y los programas de paisaje de las unidades establecidas para el sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre.

3. Resultados y Discusión

3.1 Fase I. Análisis y caracterización del paisaje.

La utilización de imágenes Landsat tiene distintas ventajas frente a otros sensores remotos. Se trata de sensores ampliamente utilizados por distintas áreas del conocimiento. Sin embargo, solo desde hace pocos años sus datos están disponibles de forma libre para toda la comunidad científica [35]. En 2018 todavía se tenía que pagar por alguna imagen de interés;

además de considerar que existan las imágenes disponibles y necesarias para el área de estudio, así como el porcentaje de cobertura de nubes y las fechas específicas de adquisición.

Las imágenes de falso color o RGB (Red, Green and Blue), consisten en la combinación de tres bandas de información para formar una imagen en color [35]. Esta técnica suele emplearse para resaltar vegetación sana, áreas abandonadas, terrenos baldíos o caminos.

3.1.1 Identificación y descripción de unidades de paisaje.

En este apartado se hace una breve descripción de cada una de las unidades de paisaje acotadas en la figura 4. La delimitación adecuada de las unidades de paisaje permite establecer los objetivos de calidad para cada parte del territorio, así como zonificar el suelo no urbanizable [22].

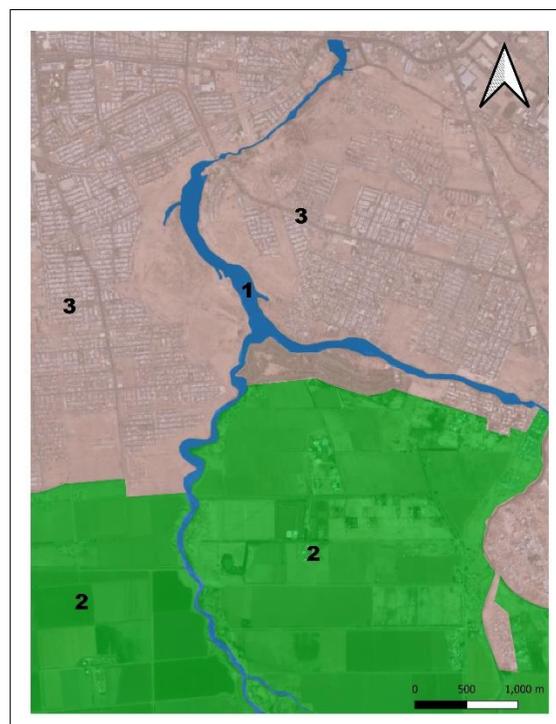


Figura 4. Unidades de paisaje caracterizadas. (1) Sistema lagunar, (2) Área agrícola y (3) Periferia urbana. Fuente: Elaboración propia. Con base en QGIS 3.14.



Unidad 1: Sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre. Es la parte central del antiguo cauce del Río Colorado durante sus grandes crecidas hacia EU, desde su desviación en el área agrícola del Valle de Mexicali en la antigua Laguna de los Volcanes [30], hasta encontrarse con el área urbana formando un cauce amplio de baja velocidad con vegetación arbustiva y riparia en los bordes. Está integrada por el cuerpo de agua (1) en la Figura 4.

Unidad 2: Área agrícola. Se trata de una superficie de producción agrícola perteneciente al Distrito de Riego 014 del Valle de Mexicali, compuesta por suelos tipo regosol de alta productividad donde se cultivan principalmente cereales, forrajes y en poca proporción frutales [36]. Está integrada por los campos agrícolas y suelos sin vegetación (2) en la Figura 4.

Unidad 3: Periferia urbana. Es una estructura urbana consolidada ubicada al sur de la ciudad producto de la expansión urbana. Se compone de fraccionamientos de tipo medio y de interés social, algunos aún limitados en dotación de infraestructura urbana, con diversos servicios comerciales e innumerables terrenos baldíos producto del abandono de áreas de cultivo aledañas. Está integrada por áreas residenciales, áreas verdes, zona industrial-comercial, terrenos baldíos y vialidades (3) en la Figura 4.

3.1.2 Caracterización de las unidades de paisaje (recursos paisajísticos).

Se establecen en este apartado las características más importantes de cada unidad de paisaje como son: agua, vegetación y suelo. También se enlistan las características que degradan y si existen recursos visuales, culturales y ambientales que destaquen en cada unidad de paisaje.

Unidad 1. Sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre.

Tabla 1. Caracterización de la unidad de paisaje. Sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre. Fuente: elaboración propia. Con base en [37].

Cualidades paisajísticas	
Agua	Cuerpo de agua permanente de bordes definidos, con forma bidimensional. Tiene contraste con los alrededores.
Vegetación	Diversidad de especies tanto nativas como exóticas. Forma bidimensional y de bordes definidos.
Suelo	Pendiente suave con cantiles rectos de tamaño variable. Forma bidimensional con bordes definidos, colores ocre.
Elementos que degradan	
Construcciones en los bordes del cauce donde se establece la vegetación riparia.	
Vías de comunicación que fragmentan el cauce del cuerpo de agua.	
Ubicación del centro de transferencia de residuos municipales en el borde del cuerpo de agua.	
Recursos paisajísticos culturales	
Leyenda sobre la existencia de un monstruo que habita la Laguna Xochimilco.	
Recursos paisajísticos ambientales	
Parque residencial en los alrededores de la laguna México (parque Lagos del Sol).	
Utilización del cuerpo de agua para avistamiento de aves y educación ambiental.	
Recursos paisajísticos visuales	
Avistamiento de aves la mayor parte del año.	
Vistas de atardeceres y amaneceres en las orillas del sistema lagunar.	



Unidad 2. Área agrícola.

Tabla 2. Caracterización de la unidad de paisaje. Área agrícola. Fuente: elaboración propia. Con base en [37].

Cualidades paisajísticas	
Agua	No visible, tipo canal, con velocidad predominantemente baja. Forma bidimensional.
Vegetación	Cultivos variados que dependen de la época de siembra, la mayoría estacionales. Vegetación riparia permanente. Forma bidimensional y de bordes definidos.
Suelo	Pendiente suave, se aprecia el contraste con la vegetación por los colores ocre de los terrenos en labranza o abandonados. Forma bidimensional de bordes definidos.
Elementos que degradan	
Basura en los canales de riego.	
Quemas parcelarias.	
Relleno del cauce de agua para ganar terreno agrícola.	
Recursos paisajísticos culturales	
NA	
Recursos paisajísticos ambientales	
Campo de golf que utiliza parte de la Laguna Campestre para su circuito.	
Canteras de recursos pétreos por la carretera federal No. 5 (Mexicali-San Felipe).	
Recursos paisajísticos visuales	
Avistamiento de fauna y flora nativas de la región.	
Vistas de atardeceres y amaneceres.	

Unidad 3. Periferia urbana

Tabla 3. Caracterización de la unidad de paisaje. Periferia urbana. Fuente: Elaboración propia. Con base en [37].

Cualidades paisajísticas	
Agua	Cuerpo de agua permanente de bordes definidos, con forma bidimensional. Tiene contraste con los alrededores.
Vegetación	Pocas especies que quedan restringidas a la zona donde se represó el sistema lagunar.
Actuaciones humanas	Crecimiento urbano en expansión. Tiene una distribución dominante, algunos fraccionamientos están bien conservados, otros están abandonados y/o deteriorados.
Elementos que degradan	
Crecimiento expansivo de los fraccionamientos habitacionales.	
Relleno y azolve de los canales de agua.	
Lotes baldíos que se usan como tiraderos de basura.	
Recursos paisajísticos culturales	
NA	
Recursos paisajísticos ambientales	
Senderos ecológicos en las riberas del sistema lagunar.	
Educación ambiental a grupos escolares que visitan el sistema lagunar.	
Recursos paisajísticos visuales	
Atardeceres y amaneceres.	
Avistamiento de aves.	



3.2 Fase II. Valoración del paisaje

3.2.1 Evaluación de expertos

Análisis FODA. Se utilizó la matriz FODA con el objetivo de valorar el manejo sustentable del paisaje, ya que permite evidenciar y reflexionar aquellos aspectos tanto positivos como negativos presentes en una organización de cualquier naturaleza [38]. En el caso del manejo y cuidado del paisaje, el análisis FODA permite diagnosticar cuáles son los puntos fuertes en los que se deben basar las estrategias de desarrollo y conservación del paisaje; así como conocer los

puntos débiles que se deben cuidar para evitar su deterioro; además de aprovechar las oportunidades para obtener el máximo rendimiento posible; y evidenciar aquellos riesgos y amenazas que pueden traer consecuencias negativas para el paisaje del sistema lagunar. En la Tabla 4 se presenta la matriz FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas) elaborada de las unidades de paisaje caracterizadas del sistema lagunar.

Tabla 4. Matriz FODA de las unidades de paisaje Fuente: Elaboración propia.

		Fortalezas		Oportunidades					
Factores Internos	F1	Abundancia de cauces naturales e infraestructuras hidro-agrícolas como espacios históricos y de conservación.		O1	Fomento del turismo ecológico.		Factores Externos		
	F2	Importante patrimonio paisajístico-cultural del sistema lagunar y del Valle de Mexicali.		O2	Fomento del turismo alternativo.				
	F3	Mexicali ciudad fronteriza con California, EU.		O3	Incremento de la importancia económica del turismo regional.				
	F4	Cultura popular, paisaje agropecuario con elementos valorados por la población en general.		O4	Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali 2025 (PDUCP Mexicali 2025).				
	F5	Establecimientos rurales para venta y/o degustación de productos agrícolas.		O5	Plan Estatal de Ordenamiento Territorial.				
			Debilidades		Amenazas				
	D1	Existencia de fragmentación urbana que dificulta unión y funcionalidad del territorio.		A1	Incremento de la presión urbana sobre el sistema lagunar.				
	D2	Falta de normatividad municipal y estatal específica e integral sobre humedales.		A2	Fragmentación del paisaje.				
	D3	Baja valoración del sistema lagunar como espacio de riqueza ecológica.		A3	Aumento de la población.				
	D4	Insuficiente aprovechamiento del potencial eco-turístico del sistema lagunar.		A4	Inseguridad.				



El siguiente paso al análisis FODA fue la elaboración de estrategias que tienen su base en los mismos resultados de la matriz. En [38] propone distintas matrices; sin embargo, para el caso de este estudio sólo se usó la Matriz de Posición Estratégica y Evaluación de la Acción (MPEEA) que permite evaluar de forma gráfica cuál es el tipo de estrategia establecida en el sistema lagunar. Para realizarla se siguieron los siguientes pasos:

- a) Enlistar las Amenazas y las Oportunidades como el eje “x” (Tabla 5).
- b) Enlistar las Debilidades y las Fortalezas como el eje “y” (Tabla 5).
- c) Asignar un peso relativo en un rango de cero (irrelevante) a 100 (muy importante) a cada factor enlistado en el eje “x”. El peso otorgado manifiesta la importancia de cada factor, considerando que las oportunidades deben tener más peso que las amenazas. La suma total debe ser 100.
- d) Asignar un peso entre cero (no importante) hasta 100 (muy importante) a cada factor enlistado en el eje “y”. El peso otorgado expresa la importancia relativa del mismo factor, y el total de todos los pesos en su conjunto deben sumar 100.
- e) Evaluar cada eje con los valores de acuerdo al peso de cada factor de acuerdo a la Tabla 6.
- f) Calcular el promedio de los valores para cada integrante del eje “x”.
- g) Calcular el promedio de las valores para cada integrante del eje “y”.
- h) Sumar promedios eje “x” para obtener un solo valor para la coordenada “x”.
- i) Sumar promedios eje “y” para obtener un solo valor para la coordenada “y”.
- j) Graficar.

Tabla 5. Matriz MPEEA. Fuente: Elaboración propia.

Eje x			Eje y		
Factor	Valor	Calif.	Factor	Valor	Calif
O1	20	6	F1	10	4
O2	18	5	F2	20	6
O3	18	5	F3	5	1
O4	6	2	F4	8	4
O5	6	2	F5	5	1
Promedio O = 4			Promedio F = 3.2		
A1	10	-6	D1	15	-6
A2	10	-6	D2	12	-5
A3	7	-4	D3	15	-6
A4	5	-2	D4	10	-3
Promedio A = -5			Promedio D = -5		
Total	100	$\Sigma(x)$ =-1.0	Total	100	$\Sigma(y)$ =-1.8

Tabla 6. Valores de cada eje. Elaboración propia basada en [38].

Eje x		Eje y	
Factores Externos		Factores Internos	
Oportunidades	Amenazas	Fortalezas	Debilidades
+6 mayor	-6 mayor	+6 mayor	-6 mayor
+1 menor	-1 menor	+1 menor	-1 menor

Finalmente se graficó la coordenada obtenida de la matriz MPEEA la que se ubicó en el cuadrante de las estrategias de supervivencia (D-A), las que según [39] son las estrategias más complejas donde se trata de minimizar las debilidades que pueden agravar el impacto negativo de las amenazas. Las Debilidades (eje “y”) más importantes son: la fragmentación urbana, una baja apreciación de la riqueza ecológica del sistema lagunar y la falta de normatividad en cuanto a la protección del paisaje de los humedales; las cuales empeoran el impacto negativo de las Amenazas (eje “x”) como son: el incremento en la presión urbana debido al aumento de la población y la fragmentación del paisaje del sistema lagunar. Por lo que se hace necesario el impulso de la normatividad en la gestión del territorio para lograr la integración del paisaje y por ende, la sostenibilidad del sistema lagunar.

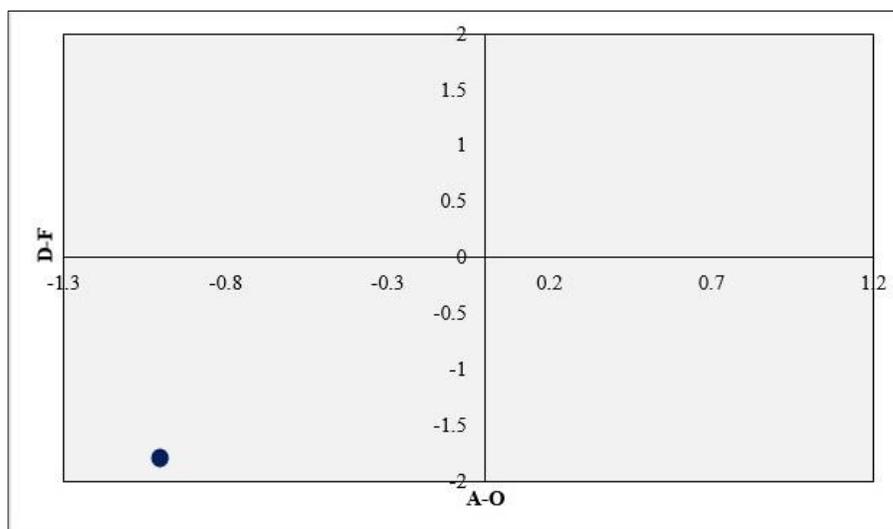


Figura 5. Gráfica de la coordenada de la matriz MPEEA. Elaboración propia basada en [38].

3.2.2 Calidad paisajística

Se usaron las características físicas y estéticas de las unidades de paisaje que pueden ser medibles como: formas del terreno, vegetación, agua, color, influencia adyacente, contexto escénico, escasez o rareza y modificaciones debido a actuaciones humanas en donde a cada componente se le asigna un puntaje según criterios de valoración establecidos en la metodología BLM y que se presentan en la tabla 7. Se trata de un método indirecto según [41] y [42], aunque [42] considera que el método BLM es más bien un método mixto, debido a que se realiza una evaluación indirecta del paisaje considerando las principales características visuales que lo componen y se les otorga un valor numérico a su calidad visual.

Originalmente el método BLM fue diseñado por el gobierno de EU para evaluar la calidad visual de paisajes montañosos [40], sin embargo ha demostrado su utilidad en diversos escenarios, como lo demuestra su uso para evaluar la calidad

del paisaje en el proyecto Alférez San Marcos en Colombia, donde las unidades de paisaje estudiadas estaban asociadas principalmente a zonas residenciales, turísticas, vías de comunicación infraestructuras urbanas, comerciales, así como canales de riego y producciones agrícolas intensivas y semi-intensivas [43]. O en el trabajo realizado por [40] que usó la metodología BLM para evaluar la calidad visual del paisaje en el frente costero de la ciudad de Ensenada, Baja California. También se utilizó la metodología BLM en [34] para evaluar el impacto visual que causó la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda, Moa en Cuba.

En todos estos estudios se muestra la utilidad del método cuando no existe otra metodología específica para la zona de estudio y en donde se necesite evaluar al paisaje debido a la presencia de componentes naturales raros o a la presencia de actividades humanas que degraden o transformen el paisaje.



Tabla 7. Criterios y puntaje de evaluación establecidos en BLM [32].

Componente	Características	Valor	Ponderación
Morfología del terreno	Relieve muy montañoso, marcado, prominente.	5	Alta
	Relieve muy montañoso pero no muy marcado ni prominente.	3	Media
	Relieve llano o con colinas suaves, fondos de valles.	1	Baja
Vegetación	Gran variedad de tipos de vegetación.	5	Alta
	Alguna variedad de vegetación.	3	Media
	Poca o ninguna variedad de vegetación.	1	Baja
Agua	Factor dominante, apariencia limpia y clara.	5	Alta
	No dominante en el paisaje.	3	Media
	Ausente o inapreciable.	0	Baja
Color	Combinaciones de color intensas y variadas, o contrastes del suelo o entresuelo, vegetación, rocas y nieves.	5	Alta
	Alguna variedad e intensidad en los colores y contrastes del suelo, roca y vegetación, pero no actúa como elemento dominante.	3	Media
	Muy poca variación de color o contraste, colores apagados.	1	Baja
Contexto escénico	El paisaje circundante potencia mucho la calidad visual.	5	Alta
	El paisaje circundante incrementa moderadamente la calidad visual del conjunto.	3	Media
	El paisaje adyacente no ejerce influencia en la calidad del conjunto.	0	Baja
Rareza	Único o poco corriente o muy raro en la región. Posibilidad de encontrar fauna y vegetación excepcional.	5*	Alta
	Característico aunque similar a otros en la región.	2	Media
	Bastante común en la región.	1	Baja
Actuaciones humanas	Libre de actuaciones estéticamente no deseadas o con modificaciones que inciden desfavorablemente en la calidad visual.	2	Alta
	La calidad escénica está afectada por modificaciones poco armoniosas o por modificaciones intensas o extensas.	0	Media
	Modificaciones intensas y extensas que reducen o anulan la calidad escénica.	-4	Baja

Posteriormente, la sumatoria final determinó la clase de calidad visual por comparación con la

siguiente escala de referencia establecida en la tabla 8:



Tabla 8. Clases de calidad visual establecidos en BLM [32].

Clase	Características	Valoración
A	El paisaje es de alta calidad, áreas con rasgos singulares y sobresalientes.	>19 puntos
B	El paisaje es de calidad media, áreas cuyos rasgos poseen variedad en la forma, color, línea y textura, pero que resultan comunes en la región estudiada, y no excepcionales.	12-18 puntos
C	El paisaje es de baja calidad, áreas con muy poca variedad en la forma, color, línea y textura.	<11 puntos

Unidad 1. Sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre



Figura 6. Sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre. (Archivo de la autora).

Tabla 9. Evaluación de la calidad paisajística del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre Fuente: Elaboración propia.

PUNTUACIÓN				
	Alto	Medio	Bajo	Explicación
Morfología del terreno	5	3	1	Relieve llano pendiente muy suave.
Vegetación	5	3	1	Pocas especies, pero muy diferenciadas.
Agua	5	3	0	Factor dominante. Apariencia tranquila.
Color	5	3	1	Combinaciones variadas entre la vegetación, el suelo y el agua.
Contexto Escénico	5	3	0	El paisaje del fondo incrementa la calidad visual del paisaje (Sierra Cucapáh).
Rareza	5*	2	1	Sistema lagunar dentro de la ciudad con vegetación riparia y presencia de aves.
Actuaciones Humanas	2	0	-4	Modificaciones que reducen la calidad escénica como las construcciones del fondo.
Total:	22			
Calidad visual:	Alta			



Unidad 2. Área agrícola.



Figura 7. Área agrícola en los alrededores del sistema lagunar. (Archivo de la autora).

Tabla 10. Evaluación de la calidad paisajística del área agrícola. Fuente: Elaboración propia.

PUNTUACIÓN				
	Alto	Medio	Bajo	Explicación
Morfología del terreno	5	3	1	Relieve llano, pendiente suave.
Vegetación	5	3	1	Pocas especies presentes.
Agua	5	3	0	Presencia no dominante.
Color	5	3	1	Variedad de color entre la vegetación y el suelo.
Contexto Escénico	5	3	0	El paisaje del fondo influye moderadamente en la calidad visual del paisaje.
Rareza	5*	2	1	Paisaje similar a otros en la región.
Actuaciones Humanas	2	0	-4	Está afectada por las modificaciones de los cultivos (presencia de cercos) la siderúrgica al fondo y postes de energía eléctrica.
Total: 15				
Calidad visual: Media				



Unidad 3. Periferia urbana.



Figura 8. Fraccionamientos en los alrededores del sistema lagunar (Archivo de la autora).

Tabla 11. Evaluación de la calidad paisajística de la periferia urbana alrededor del sistema lagunar. Fuente: Elaboración propia.

PUNTUACIÓN				
	Alto	Medio	Bajo	Explicación
Morfología del terreno	5	3	1	Relieve en hondonada, con cantiles altos en los bordes de la laguna.
Vegetación	5	3	1	Pocas especies.
Agua	5	3	0	Factor dominante, apariencia oscura y con poco movimiento.
Color	5	3	1	Combinaciones variadas entre el agua, las construcciones, el suelo y la vegetación.
Contexto Escénico	5	3	0	El paisaje del fondo ejerce influencia en la calidad visual del paisaje (negativo).
Rareza	5*	2	1	Característico de la región.
Actuaciones Humanas	2	0	-4	Está afectado por las construcciones alrededor del cauce y las líneas de electricidad (postes).
Total:	11			
Calidad visual:	Baja			

3.2.3. Participación ciudadana

Es importante involucrar a la ciudadanía en los estudios de paisaje, ya que a partir de la participación ciudadana es posible extraer información acerca de la relación que guarda el sistema lagunar (territorio) y la población sobre aspectos como lugares más frecuentados,

espacios atractivos para visitar, actividades realizadas en el sitio, memoria cultural, entre otros [22].

La encuesta aplicada constó de dos partes, la primera estuvo dirigida en recopilar los datos personales del entrevistado, donde la mayoría de los encuestados fueron mujeres (69.29%), con un



rango de edad predominante de 18 a 25 años (60.52%) y con estudios de licenciatura (62.28%). El 70.17% de los encuestados son residentes de la ciudad y el 53.50% tienen viviendo toda su vida en Mexicali.

La segunda parte de la encuesta estuvo dirigida en conocer la percepción y opinión de los entrevistados sobre el sistema lagunar, donde el 77.19% de los encuestados dijo conocer las lagunas que existen en Mexicali. Sin embargo, el 67.54% mencionó que no le agrada lo que ve en ellas y el 92.98% comentó que estaba de acuerdo en que se hiciera un plan para rehabilitar o manejar el sistema lagunar.

Las respuestas de los entrevistados a la pregunta 8 de la encuesta: ¿Cuáles son las lagunas que conoce?, se muestran en la Figura 9:

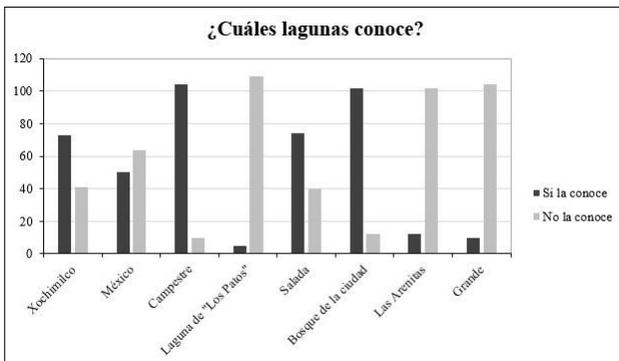


Figura 9. Respuestas de los entrevistados a la pregunta 8. Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia en la figura 9 la laguna más mencionada por los encuestados fue la Laguna Campestre que forma parte del sistema lagunar, seguida por la Laguna del Bosque de la Ciudad, que es una laguna artificial alimentada con agua del canal Wisteria y que se localiza dentro de la zona urbana. En tercer lugar se mencionó la Laguna Salada que se localiza fuera de la ciudad de Mexicali, por la carretera federal No. 2 que conduce a la ciudad de Tijuana. Se trata de un referente histórico para la comunidad indígena Cucapáh, antiguos pobladores de Mexicali,

quienes pescaban en ella durante las crecidas del Río Colorado o durante el periodo de mareas altas del Golfo de California [45]. Actualmente la Laguna Salada está seca debido a las represas construidas por parte de EU en el cauce aguas arriba del Río Colorado. La última laguna en ser mencionada fue la Laguna México, que también forma parte del sistema lagunar. Las lagunas con menores menciones fueron la Laguna de los Patos, la cual es un humedal remanente localizado por la carretera estatal 8 rumbo al poblado de "Los Algodones", seguida por la Laguna Grande y las Arenitas, ambos humedales artificiales localizados rumbo al puerto de San Felipe por la carretera federal No.5.

En la figura 10 se muestran las frecuencias marcadas de las actividades que según los entrevistados generan mayor daño al sistema lagunar. Las actividades señaladas fueron en orden de mención: basura, indiferencia de la gente, falta de aplicación de leyes por parte de las autoridades y contaminación del agua.

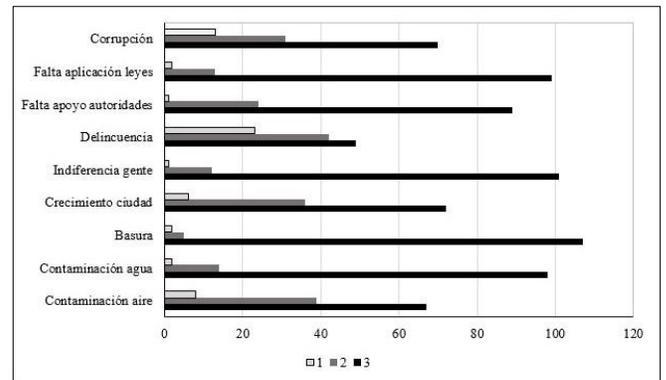


Figura 10. Valoración de los entrevistados sobre las actividades que mayor daño causan al sistema lagunar, donde 3 es mucho daño y 1 es nada de daño. Fuente: elaboración propia.

Por último, las respuestas a la pregunta 11 sobre qué acciones propondría como parte del plan de acción para el sistema lagunar se observan en la figura 11 donde las acciones con mayores menciones por parte de los encuestados fueron:



campañas de limpieza, aplicación de mayores multas a quienes destruyan, quemen y/o tiren basura y campañas de educación para concientizar a la población sobre la importancia del sistema lagunar. También se observa que las acciones con mayores menciones pueden clasificarse en aquellas con tendencia a involucrarse directamente en el manejo del sistema lagunar (campañas de limpieza, campañas educativas, voluntariado, servicio social tanto de alumnos de distintos niveles educativos como de internos del CERESO y formación de grupos ciudadanos en los alrededores del sistema lagunar); y aquellas relacionadas a la gobernanza y aplicación de las leyes (exigencia de las autoridades, mayores multas, incrementar la vigilancia en la zona del sistema lagunar, aplicación de la ley y reglamentos y monitoreo continuo).

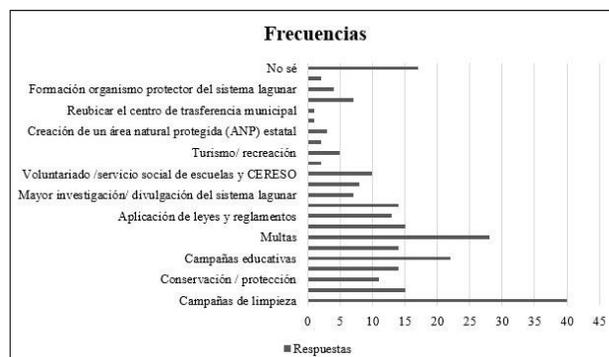


Figura 11. Respuestas de los entrevistados a la pregunta 11. Fuente: elaboración propia.

3.3 Paso III. Plan de Ordenación del Paisaje.

3.3.1 Objetivos de Calidad Paisajística

Los objetivos de calidad paisajística son líneas estratégicas de actuación, en las que se definen las aspiraciones que se proyectan hacia un paisaje, tomando en consideración la participación pública [22]. Para establecer los objetivos de calidad paisajística se deben considerar dos aspectos: el valor del paisaje y los conflictos a los que se ve sometido. Los objetivos de calidad para el sistema lagunar se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Objetivos de ordenamiento para las tres unidades de paisaje. Fuente: Elaboración propia.

	Sistema lagunar	Área agrícola	Periferia urbana
Descripción	Conservar y mantener el sistema hídrico que alimenta el sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre.	Diversificar las actividades productivas por medio de la introducción de cultivos agrícolas nativos, así como aprovechar los recursos paisajísticos del Valle de Mexicali (ecoturismo).	Regular las actividades residenciales y productivas en el área periurbana respetando el carácter natural y paisajístico de las áreas contiguas a la zona lagunar.
Valor (experto)	22 (alto)	15 (media)	11 (baja)
Objetivo de calidad	Proteger el humedal del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre	Gestionar la diversificación de las actividades económicas del Valle de Mexicali.	Ordenar la periferia y las áreas de reserva ecológica alrededor del sistema lagunar.



Una de las acciones pertinentes del objetivo de calidad paisajística del sistema lagunar, debe ser respetar la topografía original del sistema lagunar, manteniendo sus elementos naturales más significativos. Entre las formas de cumplir esta acción sería mantener la vegetación existente sana, así como reforestar con especies nativas que permitan incrementar el carácter y la singularidad del paisaje del sistema lagunar.

Como parte del objetivo de calidad paisajística de área agrícola se debe potenciar una zonificación adecuada del suelo no urbanizable, evitando la construcción de nuevos fraccionamientos; así como se deben incluir cultivos agrícolas de especies nativas que potencien la Infraestructura Verde, para mejorar el paisaje de las zonas de transición física y visual entre el sistema lagunar y el área agrícola.

Dentro del objetivo de calidad paisajística de la periferia urbana, se debe priorizar la ubicación de actividades productivas fuera del área del sistema lagunar, respetando los accesos al sistema, así como prohibir las actividades que impacten negativamente la calidad visual del sistema lagunar.

3.3.2 Programas de Paisaje.

Los programas de paisaje consisten en definir una acción prioritaria para cumplir con los objetivos de calidad paisajística planteados [22]. En la tabla 13 se presentan los programas para cada una de las unidades paisaje:

Tabla 13. Programas para cada una de las tres unidades de paisaje. Fuente: Elaboración propia.

	Sistema lagunar	Área agrícola	Periferia urbana
Actuación 1	Elaborar un programa de mejoramiento de calidad de agua.	Elaborar un programa de fomento a las actividades de ecoturismo en el Valle de Mexicali.	Actualizar la normatividad vigente referente a los planes parciales de crecimiento urbano considerando la protección del sistema lagunar.
Actuación 2	Elaborar un programa de limpieza de los cauces que alimentan al sistema lagunar.	Proponer la introducción de cultivos agrícolas nativos del Valle de Mexicali.	Elaborar un plan de ordenamiento ecológico del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre

4. Conclusiones

El valor más alto de calidad visual en la unidad de paisaje del sistema lagunar concuerda con lo mencionado por [20] para los humedales del río las Cruces, donde la sinergia entre el agua circundante y la vegetación, es extensa. Por otra parte, el valor menor hallado en la unidad de

paisaje de la Periferia urbana coincide con lo expresado en [47], donde los valores mínimos en la calidad visual de las unidades de paisaje corresponden a zonas donde el impacto de las actividades humanas en los ecosistemas es amplio. Al respecto se considera que la zona comprendida entre el sistema lagunar, la zona agrícola y la periferia urbana es donde se da la mayor conversión de suelo natural o rural a suelo



urbano, y donde también se hace patente la falta de integración en los paisajes.

Por lo que la aportación principal de este estudio es ofrecer información inicial en la evaluación de paisajes de humedales en zonas áridas, debido a que la mayoría de los estudios de paisaje que se realizan en México son, sobre todo, en ecosistemas de selvas y bosques húmedos, y muy pocos en humedales.

Con respecto al método BLM, que aunque fue diseñado para paisajes montañosos, tiene como ventaja que disminuye la subjetividad en la evaluación de la calidad visual de las unidades de paisaje, ya que al final se asigna un puntaje a cada componente según los criterios de valoración, y la suma total de los puntajes parciales determina la clase de calidad visual por comparación con una escala de referencia [41]. Como punto en contra, es posible que se termine valorando cosas que podrían no tener nada que ver con la calidad visual o la belleza de un paisaje [48]. Sin embargo, si como lo menciona [40], no se tiene un método específico para evaluar la calidad visual de la zona de estudio, entonces se deben emplear otras metodologías que consideren una evaluación al paisaje visual tanto por sus componentes naturales como por aquellos impactados por el hombre y donde sea posible obtener información cuantitativa y poder analizarla por partes.

De este modo, según [48] el método más adecuado que debe utilizarse para evaluar el paisaje deben considerar: a) un sustento teórico en el que se base, b) aceptar que se tendrá subjetividad en la evaluación, c) incluir la participación ciudadana y de expertos, y d) contar con información cartográfica en SIG que permita realizar modelos predictivos de cambio en el territorio. Todo lo anterior concuerda con el uso de métodos mixtos.

Asimismo, los resultados del análisis FODA indican que existen unidades de paisaje atractivas y con potencial de aprovechamiento, pero éstos tienen restricciones normativas, de actuación y desconocimiento por parte de la población de cómo apropiarse adecuadamente de estas unidades de paisaje. Al respecto, en [47] afirman que si no se realiza una planeación adecuada o no se tienen mecanismos multidisciplinarios para conservar y manejar los recursos naturales, hasta los programas de turismo alternativo y ecoturismo, pueden dañar los ecosistemas que se quieren mantener.

Por último, se observó por medio de la encuesta que es la gente con mayor tiempo de residencia en la ciudad la que conoce y reconoce el mayor número de humedales, conocidas coloquialmente como lagunas, en la ciudad así como sus paisajes. También es la más proactiva en cuestión de las propuestas para mejorar el paisaje de los humedales y del sistema lagunar México-Xochimilco-Campestre. A este respecto, [42] mencionan que a pesar de existir diferencias en la preferencia por ciertos aspectos del paisaje debido a la edad, nivel socioeconómico, nivel educativo o personalidad, existe un consenso entre los encuestados por las características que definen lo natural, así como la presencia de cuerpos de agua y vegetación.

En este sentido, podrían realizarse estudios que evalúen el cambio en el paisaje centrado tanto en el cuerpo de agua, como en la vegetación nativa, así como fomentar las actividades eco-turísticas para que la gente se apropie del sistema lagunar y ayude en su conservación y protección.

5. Reconocimiento de autoría

Mariana Jácome Ibarra: Conceptualización, validación, análisis formal, recursos, investigación, escritura borrador original, análisis de datos, revisión y edición



borrador. *Oswaldo Leyva Camacho*: validación, revisión y edición borrador, validación de las imágenes SIG. *Gonzalo de la Fuente de Val*: Metodología y revisión borrador.

Referencias

- [1] "La Convención de Ramsar," 2014. <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-convención-de-ramsar-y-su-misión>.
- [2] S. de la C. de Ramsar, "La Convención de Ramsar," 2014. <http://www.ramsar.org/es/>.
- [3] CONANP, "Los humedales en México," 2012. http://ramsar.conanp.gob.mx/la_conanp_y_los_humedales.php.
- [4] Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, *Los Ecosistemas y el Bienestar Humano: Humedales y Agua*. Informe de síntesis. World Resources Institute. Washington, DC, 2005. ISBN 1-56973-597-2
- [5] Ramsar, "Humedales: en peligro de desaparecer en todo el mundo," no. 78, 2006, [Online]. Available: <http://www.ramsar.org>.
- [6] Ramsar, "Servicios de los ecosistemas de humedales. Introducción," Gland, Suiza, 2015. [Online]. Available: https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/services_00_s.pdf.
- [7] V. Arroyo-Rodríguez, C. E. Moreno, and C. Galán-Acedo, "La ecología del paisaje en México: logros, desafíos y oportunidades en las ciencias biológicas," *Rev. Mex. Biodivers.*, vol. 88, pp. 42-51, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.004>
- [8] "Plan general de ordenación urbana de Catarroja (Valencia)," Catarroja, Valencia España, 2011. <https://www.catarroja.es/va/transparencia/instrumentos-planejament-urbanistic>
- [9] D. Athukorala, R. C. Estoque, Y. Murayama, and B. Matsushita, "Impacts of urbanization on the Muthurajawela marsh and Negombo lagoon, Sri Lanka: Implications for landscape planning towards a sustainable urban wetland ecosystem," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 2, pp. 1-22, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13020316>
- [10] B. Mondal, G. Dolui, M. Pramanik, S. Maity, S. Biswas, and R. Pal, "Urban expansion and wetland shrinkage estimation using a GIS-based model in the East Kolkata Wetland, India," *Ecol. Indic.*, vol. 83, pp. 62-73, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.037>
- [11] O. O. Festus, J. Wie, and A. O. Zubair, "Characterizing the landscape structure of urban wetlands using terrain and landscape indices," *Land*, vol. 9, no. 29, pp. 1-25, 2019. <https://doi.org/10.3390/land9010029>
- [12] Z. Li, W. Jiang, W. Wang, Z. Chen, Z. Ling, and J. Lv, "Ecological risk assessment of the wetlands in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration," *Ecol. Indic.*, vol. 117, p. 106677, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106677>
- [13] W. Lin, J. Cen, D. Xu, S. Du, and J. Gao, "Wetland landscape pattern changes over a period of rapid development (1985-2015) in the ZhouShan Islands of Zhejiang province, China," *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, vol. 213, pp.



148-159, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.08.024>

[14] A. J. Liu and G. N. Cameron, "Analysis of landscape patterns in coastal wetlands of Galveston Bay, Texas (USA).," *Landsc. Ecol.*, vol. 16, pp. 581-595, 2001.
<https://doi.org/10.1023/A:1013139525277>

[15] Y. Li, X. Zhu, X. Sun, and F. Wang, "Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: A case study of Lianyungang, China.," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 94, no. 3-4, pp. 218-227, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.10.006>

[16] G. Liu, L. Zhang, Q. Zhang, Z. Musyimi, and Q. Jiang, "Spatio-temporal dynamics of wetland landscape patterns based on remote sensing in yellow river delta, China. 2014, 34," *Wetlands*, vol. 34, no. 4, pp. 787-801, 2014.
<https://doi.org/10.1007/s13157-014-0542-1>

[17] A. A. A. Martínez, J. M. Rodríguez, and A. Cabrera-Hernández, "Los paisajes de humedales, marco conceptual y aspectos metodológicos para su estudio y ordenamiento," *Mercator*, vol. 13, no. 2, pp. 169-191, 2014.
<https://doi.org/10.4215/RM2014.1302.0012>

[18] L. A. Cortés-Ballén, "Aproximación al paisaje de los humedales urbanos de Bogotá dentro de la estructura ecológica principal de la ciudad," *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 27, no. 1, pp. 118-130, 2017.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.60584>

[19] A. Martínez and J. Rodríguez, "Clasificación de humedales con enfoque de paisajes y su aplicación en el caso de la Provincia de Matanzas (Cuba)," *Rev. Electrónica AGB-TL*, 2015, [Online]. Available:
<http://seer.ufms.br/index.php/RevAGB/article/view/1419>.

[20] A. Muñoz-Pedrerros, J. Moncada-Herrera, and L. Gómez-Cea, "Evaluación del paisaje visual en humedales del Río Cruces, sitio Ramsar de Chile," *Rev. Chil. Hist. Nat.*, vol. 85, no. 1, pp. 73-88, 2012.
<https://doi.org/10.4067/S0716-078X2012000100006>

[21] V. Arroyo-Rodríguez, C. E. Moreno, and C. Galán-Acedo, "La ecología del paisaje en México: logros, desafíos y oportunidades en las ciencias biológicas," *Rev. Mex. Biodivers.*, vol. 88, pp. 42-51, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.004>

[22] A. Muñoz Criado, "*Guía Metodológica: Estudios de Paisaje*". Valencia, España, p. 158, 2012. ISBN: 978-84-482-5690-2.

[23] "Gobierno del Estado de Baja California," 2014.
http://www.bajacalifornia.gob.mx/portal/nuestro_estado/municipios/mexicali/mexicali.jsp.

[24] J. Villanueva-Solís, "*Adaptación y mitigación de la isla de calor urbana y la planeación urbana sustentable, el caso de Mexicali, B. C.*," Universidad Autónoma de Baja California, Maestría y Doctorado en Planeación y Desarrollo Sustentable, 2015. Tesis Doctorado.
http://arquitectura.mx1.uabc.mx/WEB_MyDP



[DS/files/2015-VILLANUEVA-SOLIS-JORGE.pdf](#)

[25] O. Hinojosa-Huerta and Y. Carrillo-Guerrero, Capítulo: La Cuenca Binacional del Río Colorado, in: "Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización", 1a edición., C. H. C. Ávalos, Ed. México, DF: INECC, 2010, pp. 180-189. http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_publicacion=639

[26] R. Márquez-Huitzil and E. M. Peters-Recagno, "Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR) - Versión 2006-2008," México, DF, 2008. <https://rsis.ramsar.org/RISapp/files/RISrep/MX1822RIS.pdf>

[27] O. Baeza-Herrera, C. Calderón-Aguilera, J. A. Ley-Guing, A. M. González, C. Robles-Cairo, and A. J. Peimbert-Duarte, "Modelo valorativo simple para jerarquizar componentes morfológicos.," In: International Conference Virtual City and Territory. "6to. Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual" 2010. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/12725/01_Baeza_Calderon_Ley_Gonzalez_Robles_Peimbert.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[28] H. A. Domínguez-Tapia, "La legendaria Laguna México Proyecto estratégico de recreación en Mexicali, Baja California,." Universidad Iberoamericana, Seminario de Investigación. Maestría en Desarrollo Urbano. 2011.

[29] M. A. Samaniego López, "El control del río Colorado como factor histórico: La necesidad de estudiar la relación tierra/ agua," Front. norte, vol. 20, no. 40, pp. 49-78, 2008,

Accessed: Nov. 26, 2018. [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73722008000200002&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

[30] A. Walther Meade, *Origen de Mexicali*, 2a ed. Mexicali, BC. Universidad Autónoma de Baja California, 1991. ISBN: 968-6260-33-1

[31] Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Mexicali. IMIP, "Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población de Mexicali 2025," Mexicali, BC, 2007. <http://www.mexicali.gob.mx/transparencia/administracion/plandesarrollourbano/pduc2025.pdf>

[32] A. Muñoz-Criado, "Guía metodológica. Estudios de paisaje," Valencia, 2012. [Online]. Available: <http://www.agroambient.gva.es/es/web/biodiversidad/conselleria-de-infraestructuras-territorio-y-medio-ambiente>.

[33] V. G. de la Fuente, "Unidad III : Métodos de análisis y evaluación visual del paisaje," Mexicali, 2015. Material de clase. Temas selectos de Evaluación del paisaje.

[34] I. Aguilera - Fernández, Y. Batista - Legrá, S. Bastola, and L. Rojas - Purón, "Impacto visual generado por la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda, Moa," Minería y Geol., vol. 32, no. 4, pp. 141-159, 2016. <https://www.redalyc.org/journal/2235/223548649010/html/>

[35] Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI), "Censo de población y



vivienda 2020," 2021.
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html>.

[36] F. Martín-González, F. Carreño Conde, and M. A. De Pablo, "Application of Landsat images (TM and ETM+) in geostructural studies in the NW Iberian Massif," *Cad. do Lab. Xeol. Laxe*, vol. 32, no. 32, pp. 47-62, 2007.
<https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/6335>

[37] INEGI, "Síntesis de información geográfica del estado de Baja California. Apartado 7. Suelos," 2011.
<https://doi.org/10.1145/2505515.2507827>

[38] V. G. de la Fuente, "Ejercicio práctico. Unidad 12." 2015. Material de clase. Temas selectos de Evaluación del paisaje.

[39] H. Ponce, "La matriz FODA: una alternativa para realizar diagnósticos y determinar estrategias de intervención en las organizaciones productivas y sociales," *Contrib. a la Econ.*, p. 16, 2006.
<https://eco.mdp.edu.ar/cendocu/repositorio/00290.pdf>

[40] C. J. Manzano-Hoyos, "*Cómo fortalecer el análisis FODA en la formulación de estrategias*," Universidad Nacional Autónoma de México, Maestría y Doctorado en Ingeniería de Sistemas, p 86, 2015. Tesis Maestría.
https://repositorio.unam.mx/contenidos/como-fortalecer-el-analisis-foda-en-la-formulacion-de-estrategias-94156?c=4XoOWw&d=false&q=:*:*&i=1&v=1&t=search_0&as=0

[41] W. Ruiz-García, "*Evaluación de la calidad visual del paisaje en el frente costero de la*

ciudad de Ensenada, Baja California," Universidad Autónoma de Baja California, Maestría y Doctorado en Planeación y Desarrollo Sustentable. 2016. Tesis Maestría.
http://arquitectura.mx1.uabc.mx/WEB_MyDP_DS/files/2016-RUIZ-GARCIA-WENDY.pdf

[42] J. S. Pozo Antonio, "Valoración del paisaje aplicada a la ingeniería de taludes," *Obs. Medioambient.*, vol. 14, no. 0, pp. 41-67, 2011.
https://doi.org/10.5209/rev_OBMD.2011.v14.37289

[43] C. López-Contreras, A. L. Collantes-Chávez-Costa, S. Barrasa-García, and E. Alanís-Rodríguez, "Bases conceptuales y métodos para la evaluación Visual del Paisaje," *Agrociencia*, vol. 53, no. 7, pp. 1085-1104, 2019.
<https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1864>

[44] C. Colombiana, "Estudio de impacto ambiental proyecto Alférez San Marcos," Bogotá Colombia, 2018. Reporte técnico.
<https://1library.co/document/y4mpj1ky-refuerzo-suroccidental-estudio-impacto-ambiental-proyecto-alf%C3%A9rez-marcos.html>

[45] I. Aguilera-Fernández, Y. Batista-Legrá, S. Bastola, and L. Rojas-Purón, "Impacto visual generado por la explotación minera en el yacimiento Punta Gorda, Moa," *Minería y Geol.*, vol. 32, no. 4, pp. 141-159, 2016.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223548649010>

[46] J. Contreras, A. Martín-Barajas, and J. C. Herguera, "Subsidence of the Laguna Salada Basin, northeastern Baja California, Mexico,



inferred from Milankovitch climatic changes," *Geofis. Int.*, vol. 44, no. 1, pp. 103-111, 2005. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2005.44.1.554>

[47] A. Muñoz-Pedrerros, J. Moncada-Herrera, and L. Gómez-Cea, "Evaluación del paisaje visual en humedales del río Cruces, sitio Ramsar de Chile Assessment of wetland visual landscape in the Cruces River, Ramsar site of Chile," 2012. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2012000100006>

[48] A. Alberto et al., "Los paisajes de humedales, marco conceptual y aspectos metodológicos para su estudio y ordenamiento," *Rev. Chil. Hist. Nat.*, vol. 85, no. 1, pp. 169-191, 2014. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2012000100006>

[49] A. Muñoz-Pedrerros, "La evaluación del paisaje: Una herramienta de gestión ambiental," *Rev. Chil. Hist. Nat.*, vol. 77, no. 1, pp. 139-156, 2004. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2004000100011>

Derechos de Autor (c) 2022 Mariana Jácome Ibarra, Osvaldo Leyva Camacho, Gonzalo de la Fuente de Val



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](#)



Estudio estadístico de la influencia de la distribución geométrica del cátodo en la producción de energía eléctrica en una celda de combustible microbiana de sedimentos

Statistical study of the influence of the geometric distribution of the cathode in the production of electrical energy in a sediment microbial fuel cell

Marlenne Feregrino-Rivas¹ , Blenda Ramirez-Pereda^{2*} , Francisco Estrada-Godoy³ 

¹TecNM/Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, CP 80220, Culiacán, Sinaloa, México

²CONACYT-TecNM/Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, CP 80220, Culiacán, Sinaloa, México

³ESIA IPN Ticomán. Posgrado en Geociencias y Administración de los Recursos Naturales. Av. Ticomán 600, Col. San José Ticomán, Delg. Gustavo A. Madero, Postal Code 07340. México

Autor de correspondencia: Dra. Blenda Ramirez-Pereda, CONACYT-TecNM/Instituto Tecnológico de Culiacán, Juan de Dios Batíz 310, Col. Guadalupe, CP 80220, Culiacán, Sinaloa, México. E-mail: blenda.rp@culiacan.tecnm.mx. ORCID:0000-0002-8341-3737.

Recibido: 14 de Septiembre del 2021

Aceptado: 18 de Enero del 2022

Publicado: 25 de Enero del 2022

Resumen. - *El impacto negativo al ambiente por la explotación y generación de energía a partir de combustibles fósiles impone la necesidad de búsquedas de nuevas fuentes de energías renovables y sustentables. Las Celdas de Combustible Microbianas de Sedimentos (CCM-S) son una tecnología en desarrollo para la producción de bioelectricidad. Se ha demostrado que algunos microorganismos presentes en sedimentos de ambientes fluviales son capaces de producir electrones durante las reacciones bioquímicas de su metabolismo. Uno de los aspectos fundamentales en la eficiencia de una CCM-S son los electrodos del biorreactor. La presente investigación se enfocó en el estudio y demostración estadística de la influencia del diseño del cátodo de una CCM-S sobre la producción de bioelectricidad a partir de sedimentos fluviales. Se diseñaron dos cátodos de una CCM-S no dividida. Los electrodos fueron fabricados de Fibra de Carbono Unidireccional (FCU). El área total del ánodo fue de 81 cm², los cátodos evaluados tuvieron áreas de 81 cm² y 40.5 cm². Se colectaron muestras de sedimentos y agua del Río Culiacán. El volumen total de trabajo fue de 1500 ml. Se estudiaron dos CCM-S, en el primer biorreactor el cátodo fue colocado verticalmente y sumergido en el electrolito de trabajo, mientras el cátodo de la segunda celda fue colocado horizontal y parcialmente sumergido. Se determinó la diferencia de potencial eléctrico producido por ambas celdas durante 40 días y se monitorearon algunos parametros físicos. Los resultados de ambas CCM-S fueron comparados y las distribuciones de voltaje obtenidas fueron caracterizadas estadísticamente empleando el software R. Además se realizó un ANOVA mediante el test de Welch y comparaciones robustas mediante la función Lincon para comprobar la existencia de diferencias significativas entre ambos grupos. Los resultados demostraron que es posible obtener energía eléctrica a partir de los sedimentos fluviales. Se obtuvieron valores máximos de voltaje de 513 mV y 664.7 mV para las celdas 1 y 2, respectivamente, evidenciando que la disposición del cátodo en la celda influye en la energía producida. El estudio estadístico avanzado comprobó que existen diferencias significativas entre las medias de las distribuciones de voltaje de ambas celdas, con un p-value de 0.01 con un nivel de confianza de 95%.*

Palabras clave: Celda de combustible microbiana de sedimento; Sedimentos fluviales; Diseño de electrodos; Bioelectricidad; Técnicas estadísticas avanzadas.

Abstract. - *The negative impact on the environment by the exploitation and generation of energy from fossil fuels imposes the need to search for new sources of renewable and sustainable energy. Sediment Microbial Fuel Cells (S-MFC) are a developing technology to produce bioelectricity. Some microorganisms present in sediments of river environments can produce electrons during the biochemical reactions of their metabolism. One of the fundamental aspects in the efficiency of a S-MFC are the electrodes of the bioreactor. The present investigation focused on the study and statistical demonstration of the influence of the cathode design of a S-MFC on the production of bioelectricity from river sediments. Two cathodes of an undivided CCM-S were designed. The electrodes were made of Unidirectional Carbon Fiber (UCF). The total anode area was 81 cm², the evaluated cathodes had areas of 81 cm² and 40.5 cm². Sediment and water samples were collected from the Culiacán River. The total working volume was 1500 mL. Two S-MFC were studied, in the first bioreactor the cathode was placed vertically and completely submerged in the working electrolyte, while the cathode of the second cell was placed horizontally and partially submerged. The electric potential difference produced by both cells for 40 days was determined. An advanced ANOVA was performed to compare the means of the voltage distributions. The results showed that it is possible to obtain electrical energy from river sediments. Maximum voltage values of 513 mV and 664.7 mV were obtained for cells 1 and 2, respectively, showing that the arrangement of the cathode in the cell influences the energy produced. The advanced statistical study verified that there are significant differences between the means of the voltage distributions of both cells, with a p-value of 0.01 with a confidence level of 95%.*

Keywords: Microbial sediment fuel cell; River sediments; Electrode design; Bioelectricity; Advanced statistical techniques.



1. Introducción

La demanda energética mundial depende actualmente en gran medida de los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural). La extracción y el consumo de estos combustibles tienen un impacto negativo en el medio ambiente, provocando un aumento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1], [2], [3].

El crecimiento económico mundial está directamente relacionado con la demanda y el consumo de energía. Actualmente se tiene un desabasto de energía a nivel mundial evidenciado especialmente en términos de transporte, industria y hogar. Por estas y otras razones, investigadores de todas las naciones preocupados por el abastecimiento de combustibles y la sostenibilidad del planeta, han dedicado esfuerzos al estudio de Nuevas Fuentes de Energía Renovable (NFER). Las energías eólica, geotérmica, hidráulica y solar son Fuentes de Energía Renovable (FER) ubicadas en zonas con alto potencial de implementación.

Las zonas geográficas para la instalación y producción de FER deben tener condiciones climáticas favorables para su desarrollo y de esta forma garantizar el suministro de energía actual y futura [4], [5], [6]. La preocupación por la crisis energética, los cambios ambientales y la dependencia de las FER de las condiciones climáticas de las zonas de ubicación han traído al foco de atención internacional las NFER. Una de las tecnologías más recientes planteadas en Foros Internacionales son las celdas de combustible microbianas (CCM) [7], [8], [9].

Las CCM son dispositivos que convierten la energía química de un sustrato en energía eléctrica debido a la acción biocatalizadora de microorganismos. Esta nueva tecnología proporciona energía, con perspectivas de desarrollo y se considera amigable con el medio

ambiente [10]. De manera general una CCM, es un biorreactor electroquímico, también conocido como biobatería o biopila. Una batería es un reactor electroquímico (celda galvánica) donde a partir de reacciones químicas espontáneas se produce energía eléctrica. La celda galvánica es un sistema electroquímico que consta de un par de reacciones químicas, conocido como reacciones REDOX. En el par redox, un agente reductor es capaz de perder electrones y producir una especie oxidada. Los electrones son tomados por un agente oxidante y se obtiene una especie reducida. Ambas reacciones deben ocurrir simultáneamente. El flujo de electrones que ocurre de una especie a otra da lugar a una corriente eléctrica que puede ser aprovechada [11], [12].

En el caso de las CCM los microorganismos son los principales responsables de ceder los electrones al sistema electroquímico mientras otra especie química los toma para asegurar la reacción complementaria del par redox. Para que ocurra la transferencia de electrones se necesita que las especies donadora y receptora estén en contacto con un material conductor, llamado electrodo. El electrodo que capta los electrones desde el donador es conocido como ánodo. Los electrones viajan a través de cables conductores mediante un circuito externo y llegan al electrodo que los recibe, conocido como cátodo [13], [14].

Los electrones cedidos por los microorganismos son obtenidos a partir de los procesos metabólicos de estos, específicamente la oxidación de un sustrato. Se han detallado el uso de numerosos sustratos empleados en CCM como sustratos convencionales [15], aguas residuales [16], [17], lodos activados o anaerobios [18], [19] o cualquier otro tipo de materia orgánica. La materia orgánica es considerada como un componente importante en la fertilidad de los suelos por su aporte de minerales y nutrientes en suelos. Estos



componentes aportan energía a los microorganismos que habitan en suelos y sedimentos. Además, se conoce que los minerales y nutrientes son acarreados mediante la acción fluvial de drenajes naturales como arroyos, ríos y finalmente se depositan en los mares, lo cual lleva a pensar que involucra funciones de tipo biológico, químico y físico [20], [21].

El uso de sedimentos como sustrato en CCM es una tecnología innovadora, llamada celda de combustible microbiana de sedimentos (CCM-S). La comunidad microbiana presente de forma natural en los sedimentos de ambientes marinos y fluviales puede generar energía eléctrica [22], [23], [24]. Una CCM-S funciona al introducir el ánodo en el sedimento conectado a un circuito eléctrico externo que llega al extremo de conexión con el cátodo. Por su parte, el cátodo se

encuentra sumergido o semisumergido en el electrolito, que en muchas ocasiones se emplean aguas tomadas del área donde se obtuvieron los sedimentos.

Al interior de la CCM-S tienen lugar reacciones tanto bioquímicas como electroquímicas; primero la oxidación bacteriana proveniente de la materia orgánica contenida en el sedimento conlleva a la producción de electrones, estos son captados por el ánodo y posteriormente fluyen a través de un circuito eléctrico externo hasta llegar al cátodo. En la superficie del cátodo los electrones entran en contacto con el O_2 y en presencia de protones (H^+) toma 4 electrones del medio para formar H_2O (Ecuación 1) (Figura 1) [25], [26], [27], [28].

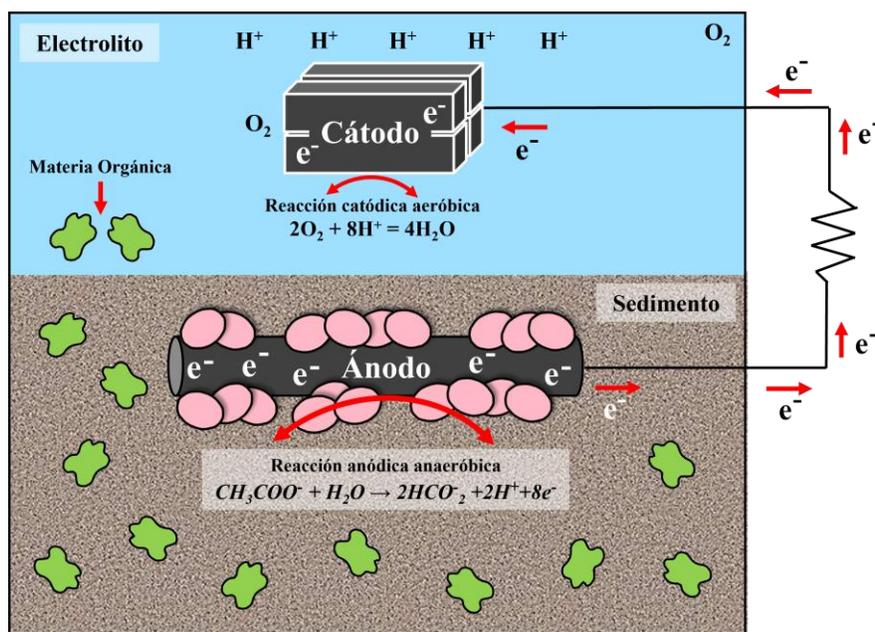
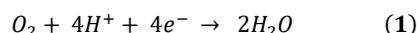


Figura 1. Esquema de la producción de energía eléctrica en una CCM-S.

Numerosos autores han referido la posibilidad de obtener energía eléctrica a partir de sedimentos. Los trabajos reportados han abordado las investigaciones desde diferentes puntos de vista

tales como origen del sedimento, materiales de electrodo, tipo de celda empleada, entre otros. La tabla 1 muestra algunas de las investigaciones más relevantes en ese sentido.



Tabla 1. Producción de energía recuperada en CCM-S.

No.1	Tipo de Celda	Material anódico	Origen del sedimento	Energía producida	Ref.
1	No Dividida	Placa de Grafito	Sedimentos Marinos	Densidad de corriente 0.67 mA	[21]
2	No Dividida	Placa de Grafito	Sedimentos Agrícolas	Densidad de potencia 22.19 mW m ⁻²	[27]
3	No Dividida	Filtro Fibra de Carbono	Sedimentos Agrícolas	Densidad de potencia 73 mW m ⁻²	[29]
4	No Dividida	Cepillo de Fibra de Carbono	Sedimentos Fluviales	Eficiencia coulombica 0.56 ± 0.26 V	[30]
5	No Dividida	Filtro de Fibra Carbono	Sedimentos Fluviales	Densidad de potencia 28 mW m ⁻² ± 4 mW m ⁻²	[31]

Los resultados resumidos en la tabla 1 demuestran que las CCM-S no divididas son las que se han empleado con mayor frecuencia debido a ser una configuración sencilla y de fácil implementación y bajos costos al no incluir una membrana de intercambio [32], [33]. De la tabla 1 también destaca que los materiales de carbono se han utilizado ampliamente para la fabricación de electrodos en CCM-S.

Dentro del diseño y configuración de electrodos a base de este tipo de material se pueden identificar subgrupos de acuerdo a la estructura física-química del material. Por ejemplo, materiales de forma plana como la placa de grafito tienen una estructura compacta y una superficie relativamente lisa, lo que puede

facilitar la medición cuantitativa de la biomasa por unidad de área en la superficie del electrodo [34]. Por otro lado, los materiales como el filtro y la fibra son más flexibles y porosos, lo que permite una mayor superficie para el crecimiento microbiano [29].

Por último, los materiales 3D como el cepillo de fibra de carbono logra una mayor área superficial, ya que al contar con porosidades grandes se logra tener una buena difusión del sustrato en el interior del cepillo con mayor capacidad de corriente [30]. La Figura 2 evidencia la proporción del uso de materiales de carbono que se ha encontrado en los reportes de CCM-S.

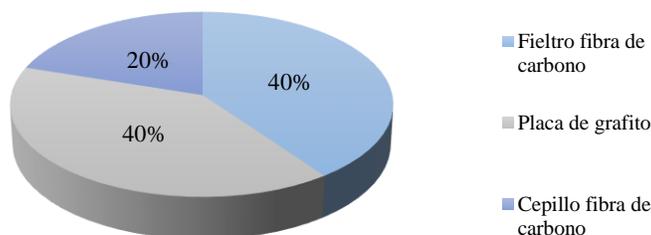


Figura 2. Proporción reportada del uso de materiales anódicos en CCM-S.

Si bien se ha demostrado que es posible la producción de electricidad en este tipo de celdas la cantidad de energía que se obtiene es muy baja (tabla 1). Al día de hoy las investigaciones para aumentar la densidad de potencia y por tanto, la eficiencia, en estos tipos de dispositivos sigue siendo de interés por parte de la comunidad científica. Se ha comprobado que el tipo y calidad de sustrato empleado, la comunidad microbiana y la arquitectura de las celdas, son aspectos fundamentales para incrementar la eficiencia de las CCM-S. Sin embargo, además de los anteriores, el estudio de los materiales de electrodos ha recibido una gran atención. Variaciones en el tipo de material, formas geométricas y ubicación dentro de las celdas han demostrado que tienen un impacto directo sobre la producción de energía, debido a que se favorece, entre otras cosas, la cinética del par REDOX. Por ello es importante el estudio de nuevos materiales, así como sus formas y en especial la ubicación dentro de las CCM, para hallar los mejores y aumentar la potencia de salida de las estas [22], [35], [36].

La presente investigación se enfocó en el estudio de la influencia de la distribución geométrica de dos cátodos en la producción de energía eléctrica de una CCM-S. Para esto dos celdas idénticas fueron diseñadas solamente cambiando el área y

posición geométrica de los cátodos de ambas celdas. A partir de los resultados obtenidos se realizó un análisis estadístico para seleccionar el cátodo de mayor producción de energía.

2. Metodología experimental

2.1 Muestra de sedimento

Para llevar a cabo el presente estudio se colectaron muestras de agua y sedimento del río Culiacán (X: 241286 y Y: 2743591 UTM (Universal Transverse Mercator)). Los sedimentos fueron colectados a una profundidad de 20 cm por debajo de la interfaz agua-sedimento dentro del río. El agua fue colectada de las zonas donde se tomaron los sedimentos. Para su traslado al laboratorio y su preservación todas las muestras fueron conservadas a 4 °C.

2.2 Sistema experimental

Para realizar el trabajo experimental se diseñó una CCM-S con dos cátodos diferentes. Se empleó un biorreactor de material tipo PET de volumen total 2300 ml, el volumen de trabajo, considerado de manera general, fue de 2000 l, donde 1500 g correspondieron al sedimento y 500 ml de agua proveniente del cuerpo de agua del Río Culiacán. Se seleccionó una Fibra de



Carbono Unidireccional (FCU) 12 K como material de electrodo debido a su bajo costo, alta capacidad de transferencia de electrones, alta eficiencia en la producción de energía y alta resistencia a las condiciones ambientales a largo plazo. El ánodo se fabricó con un área total de 81.0 cm^2 y en el caso del cátodo se diseñaron dos tipos: el primero se fabricó con un área total de 81 cm^2 , para mantener una relación con el área anódica [1:1], para el segundo se redujo la relación A.ánodo/A.cátodo a [2:1] con un área total de 40.5 cm^2 . Dentro de la celda el ánodo se colocó de forma horizontal enterrado en el sedimento a una distancia de 3 cm del fondo, en

ambos casos. Por su parte, el primer cátodo se sumergió completamente en el electrolito colocado de forma vertical con respecto a la superficie del electrolito (celda CCM-S/1a) (Figura 3a), mientras el segundo cátodo se colocó de forma horizontal parcialmente sumergido en la interfase electrolito/aire (celda CCM-S/1b) (Figura 3b). Todos los electrodos se reforzaron con barras de grafito para darle estabilidad a la FCU. Para hacer la conexión eléctrica del circuito externo cada extremo de electrodo se conectó a un multímetro a través de un alambre de cobre.

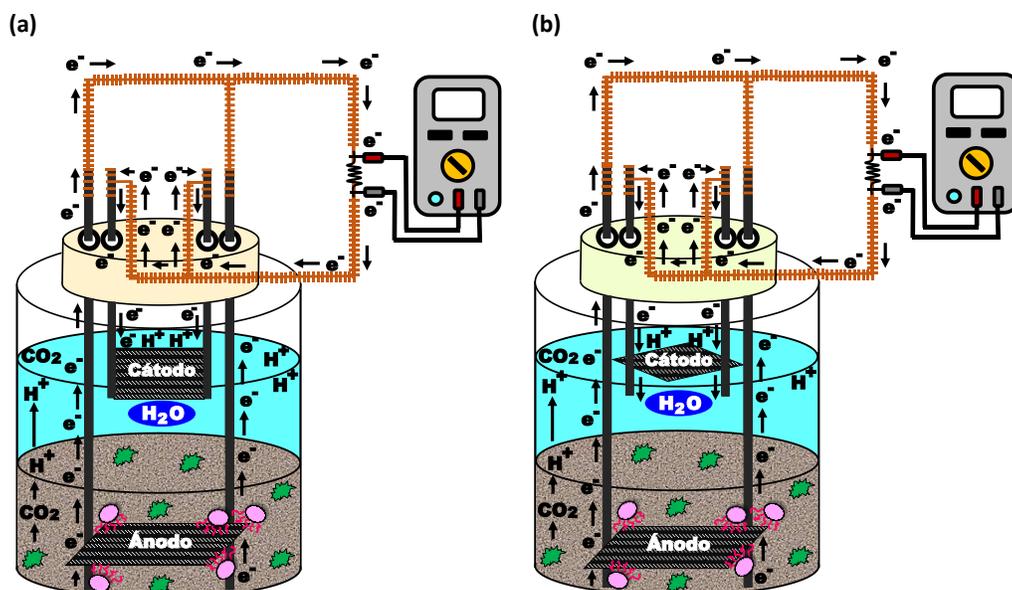


Figura 3. Esquema de CCM-S no dividida con sedimentos y electrolito fluviales. (a) CCM-S/1a cátodo vertical sumergido. (b) CCM-S/1b cátodo horizontal parcialmente sumergido.

2.3 Condiciones experimentales

Los experimentos se siguieron durante 40 días, se midió la diferencia de potencial eléctrico de las dos celdas estudiadas. Toda la experimentación se realizó en el laboratorio a temperatura ambiente. Los estudios de cada celda se realizaron por duplicado y se trabajó con el promedio de los valores de cada una de las celdas.

2.4 Análisis estadístico

Para determinar y corroborar cuál de las dos CCM-S tuvo un mejor desempeño en cuanto a la producción de energía eléctrica se realizó un análisis estadístico empleando el software R versión 4.0.5 [37]. Ambas distribuciones de voltaje se caracterizaron empleando técnicas de estadística descriptiva. La existencia de diferencias significativas entre la producción de energía de ambas celdas se comprobó mediante un análisis de varianza avanzado empleando



estadística robusta para tratar la falta de normalidad de las distribuciones [38]. Se utilizó el test de Welch, se obtuvo el valor de sus estadísticos F_{we} y el p-valores de cada análisis con un nivel de confianza del 95%. Comparaciones robustas Lincon fueron usadas para pruebas post hoc.

3. Resultados y Discusión

3.1 Influencia del diseño catódico en la producción de energía CCM-S/1a y CCM-S/1b

Para evaluar la producción de energía eléctrica de sedimentos fluviales y la influencia del diseño catódico se estudiaron dos celdas con cátodos diferentes. En la celda CCM-S/1a el cátodo se colocó sumergido de forma vertical con un área total de 81cm^2 . Mientras en la celda CCM-S/1b el cátodo se colocó parcialmente sumergido de forma horizontal con un área total de 40.5 cm^2 . Los resultados demostraron que es posible producir energía eléctrica a partir de sedimentos obtenidos del Río Culiacán. En ambas celdas se identificó un período de adaptación durante los primeros días, tal y como lo plantean [39] en su reporte. La CCM-S/1a inició con un voltaje de

37.8 mV en el día cero, alcanzando un voltaje máximo de 513.0 mV el día 25, luego alcanza un mínimo sin embargo se recupera hasta 504.8 mV y finalmente decae hasta un voltaje final de 12.0 mV al día 40. Por su parte, la CCM-S/1b comenzó con un voltaje de 156.0 mV en el día cero logrando un voltaje máximo el día 35 con 664.7 mV. Es importante señalar que al finalizar el experimento el día 40, los valores de voltaje de la celda CCM-S/1b se sostenían con un valor medio de 556.8 mV a diferencia de la CCM-S/1a en la cual no fue posible sostener una media máxima de voltaje luego de su punto máximo. La Figura 4 muestra el comportamiento de la producción de energía para ambas celdas de estudio. Los resultados logrados en la investigación son similares a resultados reportados por [40] donde los autores obtuvieron un voltaje a circuito abierto de 515 mV empleando un consorcio bacteriano halófilo en una CCM alimentada con aguas residuales de la industria pesquera. Por otra parte, los voltajes de ambas celdas son superiores al mayor voltaje obtenido por [25] donde solo alcanzaron un promedio de 280 mV en una CCM-S de sedimentos marinos.

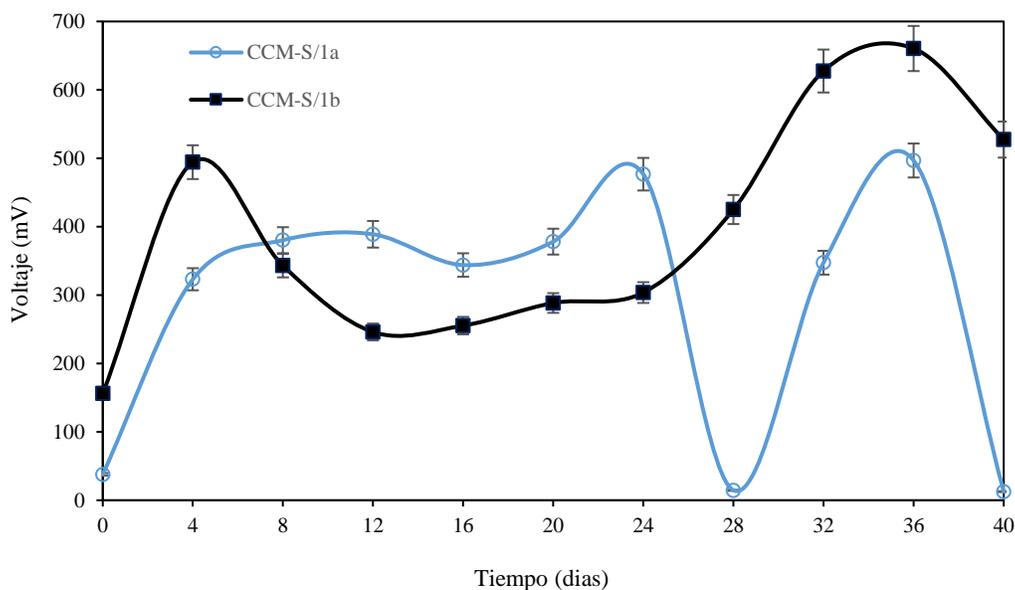


Figura 4. Voltaje producido por una CCM-S alimentada con sedimentos fluviales del Río Culiacán, electrodos de FCU 12K. (○) CCM-S/1a cátodo vertical completamente sumergido con $A_{\text{ánodo}} 81\text{ cm}^2$ y $A_{\text{cátodo}} 81\text{ cm}^2$. (■) CCM-S/1b cátodo horizontal parcialmente sumergido con $A_{\text{ánodo}} 81.0\text{ cm}^2$ y $A_{\text{cátodo}} 40.5\text{ cm}^2$.



Durante el tiempo de experimentación se comprobó una variabilidad en el voltaje, particularmente en la celda CCM-S/1a, este comportamiento puede estar relacionado con la propia naturaleza dinámica del sedimento [41]. Además en los sedimentos coexisten múltiples comunidades microbianas que tienen fases de adaptación, crecimiento y muerte diferentes, provocando variación en la energía producida por las celdas. Por otra parte en la celda CCM-S/1b se evidencia una tendencia a lograr períodos de estabilidad de voltaje mayor lo cual es favorable para plantear estrategias ingenieriles de implementación. Tomando en cuenta que ambas celdas fueron mantenidas en condiciones similares el comportamiento del voltaje en la celda CCM-S/1b indica que la distribución geométrica del cátodo mejora el desempeño del dispositivo. La idea anterior también fue reportada por [42], los autores demostraron que al sustituir el material catódico, carbón vegetal por carbón activado, la producción de electricidad fue incrementada debido a que se favoreció la reducción del oxígeno.

Como se evidencia en la Figura 4 existen diferencias entre los valores de diferencia de potencial eléctrico producidos por cada una de

las celdas. La CCM-S/1a con el cátodo totalmente sumergido alcanzó valores menores de voltaje durante todo el tiempo que se llevó a cabo el experimento, incluso teniendo un área catódica similar a la anódica y siendo el doble del área del cátodo de la celda CCM-S/1b. Además, se observó una gran variabilidad en su producción de voltaje evidenciado por la presencia de varios máximos y mínimos en su gráfica. Por el contrario, la CCM-S/1b demostró una mayor estabilidad en su producción de voltaje, se observa un mínimo en los primeros días de seguimiento que puede estar asociado a la adaptación de la comunidad microbiana a la restricción de sustrato disponible en el sedimento. Además, se lograron mayores valores de voltaje incluso con una relación $A_{\text{ánodo}}/A_{\text{cátodo}}$ de [2:1] (Figura 5). Al comparar los valores de voltaje obtenidos para cada celda se demuestra que la producción de energía eléctrica está influenciada por el diseño del cátodo. El cátodo parcialmente sumergido favorece la reducción del oxígeno a agua debido a que se elimina del sistema la transferencia de masa del aceptor de electrones a través del electrolito, por tanto, se aumenta la velocidad de la reacción catódica y con esto la producción de electricidad [43].

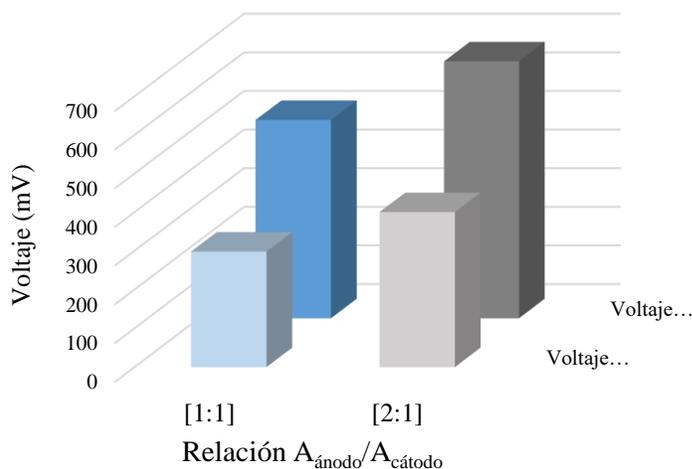


Figura 5. Relación entre $A_{\text{ánodo}}/A_{\text{cátodo}}$ y voltaje de una CCM-S de sedimentos fluviales del Río Culiacán, electrodos de FCU 12K. (■) CCM-S/1a cátodo vertical completamente sumergido con $A_{\text{ánodo}}$ 81 cm² y $A_{\text{cátodo}}$ 81 cm². (■) CCM-S/1b cátodo horizontal parcialmente sumergido con $A_{\text{ánodo}}$ 81.0 cm² y $A_{\text{cátodo}}$ 40.5 cm².



3.1 Análisis estadístico

A partir de los resultados obtenidos de voltaje para cada CCM-S se realizó un análisis estadístico detallado. La Tabla 2 muestra un resumen de los valores descriptivos de la distribución para cada CCM-S, donde Q_1 y Q_3 son el primer y tercer cuartil, respectivamente.

Los valores demuestran que la media de producción de voltaje para la celda con el cátodo horizontal parcialmente sumergido es un 14% mayor que la media de producción de voltaje para la celda con el cátodo vertical sumergido. Este mismo comportamiento es observado para los máximos voltajes alcanzados en cada CCM-S.

Tabla 2. Estadística descriptiva para las distribuciones de voltaje de las CCM-S

Celda	Cátodo	Mínimo (mV)	Q_1 (mV)	Mediana (mV)	Media (mV)	Q_3 (mV)	Máximo (mV)	Desviación estándar (mV)
CCM-S/1a	Vertical sumergido	12.2	199.9	343.9	298.0	385.4	513.0	163
CCM-S/1b	Horizontal parcialmente sumergido	156	288.4	368.5	400.2	504.2	664.7	142

Para realizar el análisis de varianza de un solo factor primeramente se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad para las distribuciones de voltaje de cada CCM-S. Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados obtenidos mediante el gráfico de normalidad y el gráfico de cajas y bigotes, respectivamente. Se encontró que no existe normalidad de los datos

ya que los puntos no están en la diagonal del gráfico de normalidad, además los histogramas de distribución de frecuencia de los voltajes para cada biorreactor no coinciden con la forma de una distribución normal (Figura 8). Así mismo, el gráfico de cajas y bigotes muestra diferencia entre las cajas por lo que no se puede admitir una varianza común.

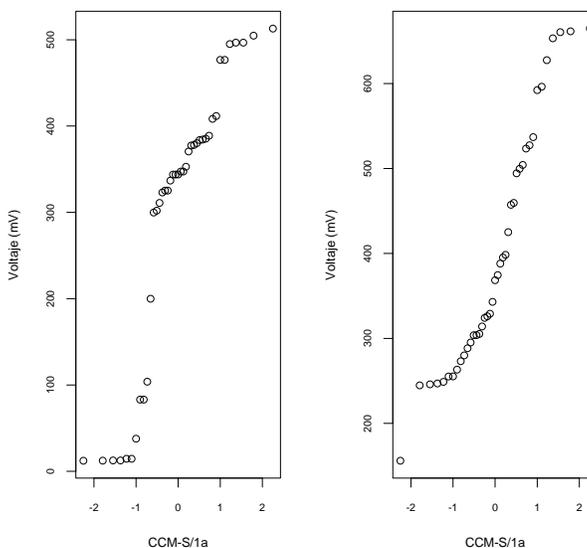


Figura 6. Gráficos de normalidad para las distribuciones de voltaje de las CCM-S. (1a) cátodo vertical sumergido. (1b) cátodo horizontal parcialmente sumergido.

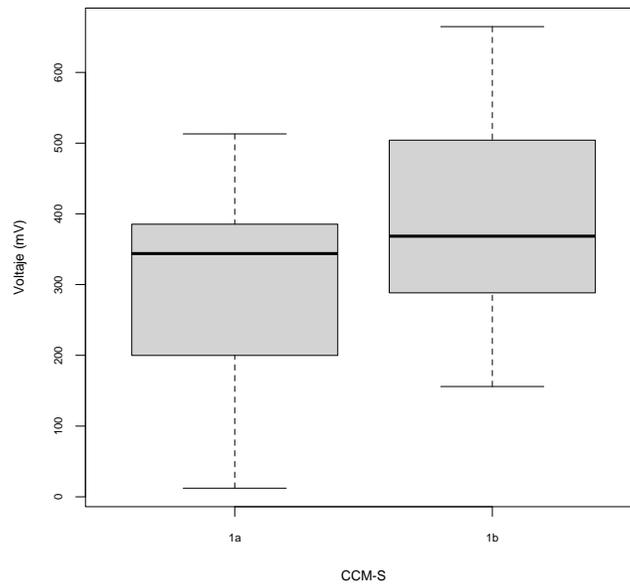


Figura 7. Gráfico de cajas y bigotes para las distribuciones de voltaje de las CCM-S. (1a) cátodo vertical sumergido. (1b) cátodo horizontal parcialmente sumergido.

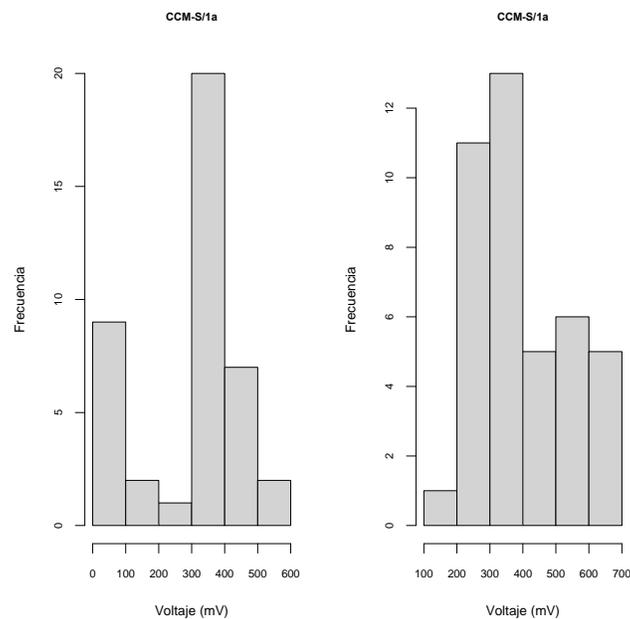


Figura 8. Histogramas de frecuencia para las distribuciones de voltaje de las CCM-S. (1a) cátodo vertical sumergido. (1b) cátodo horizontal parcialmente sumergido.

Al comprobar que las distribuciones de voltaje no cumplen con los supuestos para un análisis de varianza simple se realizó un ANOVA avanzado. Se comprobó que existen diferencias significativas entre las medias de distribución de voltaje de las CCM-S. La Tabla 3 muestra los

resultados obtenidos para el test de Welch donde se obtuvo un p-valor menor a 0.05 lo cual indica que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa de la existencia de diferencia entre la media de los grupos.



Tabla 3. Resultados del ANOVA avanzado realizado mediante el test de Welch.

TEST	No. Grupos	F _{we}	G.L Tratamientos	G.L Residuos	p-value	Ajuste (%)
Welch	2	6.570684	1	70.30385	0.01250846	5

G.L: grados de libertad

Durante la prueba post hoc realizada mediante la función Lincon se obtuvo un valor del estadístico

mayor al del criterio, por tanto, se comprueba que hay diferencia entre los grupos (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de la comparación robusta Lincon.

Grupo	Grupo	Estadístico	Criterio	SE	G.L	Ajuste (%)
1	2	2.023841	1.999176	40.73712	61.68271	5

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo se demostró que el agua y los sedimentos del Río Culiacán funcionan como sustrato natural para la recuperación de energía en CCM-S. La comparación entre los dos cátodos diseñados evidenció que ambos son favorables para la recuperación de electricidad rindiendo un máximo voltaje de 513.0 mV para el cátodo colocado de manera vertical y sumergido completamente, mientras que el máximo para el cátodo horizontal parcialmente sumergido fue 664.7 mV. Igualmente se demostró que al favorecer la reacción catódica se aumenta el voltaje de la celda incluso con un área catódica menor. El ANOVA avanzado realizado mediante el test de Welch demostró que existen diferencias significativas entre las medias de las distribuciones de voltaje de ambas CCM-S con un p-valor igual a 0.0125. Las pruebas post hoc realizadas comprobaron las diferencias entre los grupos.

El trabajo realizado abre la investigación acerca del aprovechamiento de sedimentos de origen fluvial del municipio de Culiacán para la

producción de energía eléctrica, que hasta este momento no se contaba con estudios similares en la región. Además se concluye y proporciona el diseño de una CCM-S, específicamente de un cátodo, de fácil construcción e implementación que puede ser empleada para llevar a cabo estudios posteriores.

Los trabajos experimentales que se han realizado con CCM-S muestran que es una tecnología factible para la producción de electricidad, pero aun se requiere ampliar el conocimiento práctico capaz de producir la mayor cantidad de energía posible. Investigaciones tanto en los parámetros de operación de las celdas como en los sedimentos (su calidad, sus propiedades e influencia climatológica en ellos) deben ser realizadas.

Sin dudas la tecnología de CCM-S amplía las posibilidades de obtención de energía de forma sustentable. Las CCM-S son dispositivos sencillos que pueden ser implementados en zonas remotas para satisfacer necesidades energéticas; sin embargo, se debe continuar el trabajo de investigación para mejorar la eficiencia de las celdas.



A partir de este trabajo se evidenció que los sedimentos de cuerpos de agua de la región de Culiacán pueden ser aprovechados para producir electricidad. Se recomienda ampliar el estudio a sedimentos provenientes de cuerpos de agua similares o de distinto origen, pudiéndose incluir sedimentos de origen pecuario debido a la alta presencia de esta actividad en el estado de Sinaloa.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por los recursos económicos aportados mediante becas de posgrado en programa de doctorado 2019-2023 y el proyecto de Cátedras CONACYT 212-2018.

6. Agradecimiento de autoría

Marlenne Feregrino Rivas: Investigación, curación de datos, análisis formal, borrador original, visualización; *Blenda Ramirez Pereda:* Conceptualización, investigación, análisis formal, recursos, revisión y edición; *Francisco Estrada Godoy:* Recursos, investigación, análisis formal, revisión y edición.

Referencias

[1] C. K. Chanda, and D. Bose, "Challenges of employing renewable energy for reducing greenhouse gases (GHGs) and carbon footprint," Rev. Elsevier, vol. 3, pp. 346-365, 2020.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11170-1>

[2] J. Yan, "The impact of climate policy on fossil fuel consumption: Evidence from the Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI)," Rev. Energy Economics, vol. 100, August 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105333>

[3] B. A. Gyamfi, F. F. Adedoyin, M. A. Bein, F. V. Bekun, and D. Q. Agozie, "The anthropogenic consequences of energy consumption in E7 economies: Juxtaposing roles of renewable, coal, nuclear, oil and gas energy: Evidence from panel quantile method," Rev. Journal of Cleaner Production, vol. 295, 1 May 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126373>

[4] I. Dincer, and M. F. Ezzat, "Renewable energy production," Rev. Elsevier, vol. 3, pp. 126-207, 2018.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00310-2>

[5] D. Icaza, D. Borge-Diez, and S. P. Galindo, "Analysis and proposal of energy planning and renewable energy plans in South America: Case study of Ecuador," Rev. Renewable Energy, vol. 182, January 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.126>

[6] D. Mazzeo, N. Matera, P. De Luca, C. Bagliivo, P. M. Congedo, and G. Oliveti, "A literature review and statistical analysis of photovoltaic-wind hybrid renewable system research by considering the most relevant 550 articles: An upgradable matrix literature database," Rev. Journal of Cleaner Production, vol. 295, 1 May 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126070>

[7] T. D. Tessema, and T. A. Yemata, "Experimental dataset on the effect of electron acceptors in energy generation from brewery wastewater via a microbial fuel cell" Rev. Elsevier, vol. 37, August 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107272>

[8] K. Oibileke, H. Onyeaka, E. L. Meyer, and N. Nwokolo, "Microbial fuel cells a renewable



energy technology for bio-electricity generation: A mini-review," Rev. Elsevier, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>

[9] R. Suresh, S. Rajendran, P. S. Kumar, K. Dutta, and D. V. N. Vo, "Current advances in microbial fuel cell technology toward removal of organic contaminants - A review," Rev. Chemosphere, vol. 287, January 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132186>

[10] L. Mekuto, A. V. A. Olowolafe, S. Pandit, N. Dyantyi, P. Nomngongo, and R. Huberts, "Microalgae as a biocathode and feedstock in anode chamber for a self-sustainable microbial fuel cell technology: A review," Rev. Elsevier, vol. 31, pp. 7-16, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2019.10.002>

[11] O. Modin, and F. Aulenta, "Three promising applications of microbial electrochemistry for the water sector," Rev. Environmental Science: Water Research and Technology, vol. 3, pp. 391-42, 2017.

<https://doi.org/10.1039/C6EW00325G>

[12] S. Prathiba, P. S. Kumar, and D. V. N. Vo, "Recent advancements in microbial fuel cells: A review on its electron transfer mechanisms, microbial community, types of substrates and design for bio-electrochemical treatment," Rev. Chemosphere, vol. 286, January 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131856>

[13] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, and I. Ieropoulos, "Microbial fuel cells: From fundamentals to applications," Rev. A review. Journal of Power Sources, vol. 356, pp. 225-244, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109>

[14] K. Kim, S. Nakashita, K. Yoshimura, and T. Hibino, "In situ electrochemical remediation of brackish river sediment rich in aromatic organic matter using steel-slag-combined sediment microbial fuel cells" Rev. Journal of Cleaner Production, vol. 315, 15 September 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128206>

[15] J. Hwang, K. Kim, E. P. Resurreccion, and W. H. Lee, "Surfactant addition to enhance bioavailability of bilge water in single chamber microbial fuel cells (MFCs)," Rev. Journal of Hazardous Materials, vol. 368, pp. 732-738, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.007>

[16] N. Collins N, G. Solomon O, L. Abayomi T, K. Sidikat I, S. Olusegun D, O. Clement K, A. Jacob K, S. Abolade, and B. Ayoola, "Microbial fuel cell: Bio-energy production from Nigerian corn starch wastewater using iron electrodes," Rev. materialstoday; PROCEEDINGS, vol. 46, pp. 5565-5569, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.345>

[17] Z. Xu, S. Chen, S. Guo, D. Wan, H. Xu, W. Yan, X. Jin, and J. Feng, "New insights in light-assisted microbial fuel cells for wastewater treatment and power generation: A win-win cooperation," Rev. Journal of Power Sources, vol. 501, 31 July 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230000>

[18] M. Gulamhussein, D. and G. Randall, "Design and operation of plant microbial fuel cells using municipal sludge," Rev. Elsevier,



vol. 38, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101653>

[19] C. T. Wang, T. Sangeetha, F. Zhao, A. Garg, C. T. Chang, and C. H. Wang, "Sludge selection on the performance of sediment microbial fuel cells," *Rev. Energy Research*, 26 June 2018.
<https://doi.org/10.1002/er.4168>

[20] C. Iwaoka, y S. Imada, T. Taniguchi, S. Du, N. Yamanaka, and R. Tateno, "The impacts of soil fertility and salinity on soil nitrogen dynamics mediated by the soil microbial community beneath the halophytic shrub tamarisk," *Rev. Microbial Ecology*, vol.75(4), pp. 985-996, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s00248-017-1090-z>

[21] A. Zaeni, P. E. Susilowati, Alwahab, and L. O. Ahmad. "Renewable energy from sediment microbial fuel cell technology from Kendari Bay swamp sediments," *Rev. AIP*, 2 June 2020.
<https://doi.org/10.1063/5.0011271>

[22] X. Yang, y S. Chen, "Microorganisms in sediment microbial fuel cells: Ecological niche, microbial response, and environmental function," *Rev. Elsevier*, vol. 756, pp. 1441-1445, February 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144145>

[23] K. Joksimović, A. Žeradanin, D. Randjelović, J. Avdalović, S. Miletć, G. Gojgić-Cvijović, and V. P. Beškoski, "Optimization of microbial fuel cell operation using Danube River sediment," *Rev. Elsevier*, vol. 476, 15 November 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228739>

[24] X. Lu, K. A. Haxthausen, A. L. Brock, and S. Trapp, "Turnover of lake sediments treated with sediment microbial fuel cells: a long-term study in a eutrophic lake," *Rev. Science of the Total Environment*, vol.796, 20 November 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148880>

[25] M. A. Ghazi Azari, R. Gheshlaghi, M. A. Mahdavi, and E. Abazarian, "Electricity generation from river sediments using a partitioned open channel sediment microbial fuel cell," *Rev. Elsevier Ltd*, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.185>

[26] G. A. Mohammad Ali, G. Reza, A. Mahmood, and A. Elham, "Electricity generation from river sediments using a partitioned open channel sediment microbial fuel cell," *Rev. Elsevier*, vol. 42, pp. 5252-5260, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.185>

[27] B. Neethu, and M. M. Ghangrekar, "Electricity generation through a photo sediment microbial fuel cell using algae at the cathode," *Rev. Water Science & Technology*, 2017.
<https://doi.org/10.2166/wst.2017.485>

[28] P. Namour, and L. Jobin, "Electrochemistry, a tool to enhance self-purification in water systems while preventing the emission of noxious gases (greenhouse gases, H₂S, NH₃)," *Rev. Current Opinion in Electrochemistry*, vol. 11, pp. 25-33, October 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.07.003>

[29] H. U. D. Nguyen, D. T. Nguyen, and K. Taguchi, "A Novel Design Portable Plugged-Type Soil Microbial Fuel Cell for Bioelectricity



Generation," Rev. Energies MDPI, 20 December 2020.
<https://doi.org/10.3390/en14030553>

[30] F. T. Kabutey, J. Dinga, Q. Zhao, P. Antwi, F. K. Quashie, V. Tankapa, and W. Zhang, "Pollutant removal and bioelectricity generation from urban river sediment using a macrophyte cathode sediment microbial fuel cell (mSMFC)," Rev. Bioelectrochemistry, 25 January 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.01.007>

[31] T. Ewing, P. T. Ha, and H. Beyenal, "Evaluation of long-term performance of sediment microbial fuel cells and the role of natural resources," Rev. Elsevier Ltd, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.177>

[32] F. Vicari, M. Albamonte, A. Galia, and O. Scialdone, "Effect of mode of operation, substrate and final electron acceptor on single-chamber membraneless microbial fuel cell operating with a mixed community," Rev. Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 814, pp. 104-110, 1 April 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.02.044>

[33] K. Obileke, H. Onyeaka, E. L. Meyer, and N. Nwokolo, "Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review," Rev, Vol. 125, April 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.elecom.2021.107003>

[34] Z. Najafgholi, and M. Rahimnejad, "Improvement of sediment microbial fuel cell performance by application of sun light and biocathode," Rev. Springer, 17 August 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11814-015-0123-x>

[35] A. Anjum, S. A. Mazari, Z. Hashmi, A. S. Jatoi, and R. Abro, "A review of role of cathodes in the performance of microbial fuel cells," Rev. Journal of Electroanalytical Chemistry, vol. 899, 15 October 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115673>

[36] J. Prasad, and R. K. Tripathi, "Scale Up Sediment Microbial Fuel Cell for Powering Led Lighting," Rev. Int. Journal of Renewable Energy Development (IJRED), Vol. 7, pp. 53-58, 2018.
<https://doi.org/10.14710/ijred.7.1.53-58>

[37] R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

[38] Wilcox, R.R., and Schönbrodt, F.D. (2014). The WRS package for robust statistics in R (version 0.24). Retrieved from <http://r-forge.r-project.org/projects/wrs/>.

[39] J. Prasad, and R. K. Tripathi, "Effect of sediment microbial fuel cell stacks on 9 V/12 V DC power supply," Rev. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 46, pp. 14628-14638, 19 April 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.187>

[40] M. T. Jamal, and A. Pugazhendi, "Treatment of fish market wastewater and energy production using halophiles in air cathode microbial fuel cell," Rev. Journal of Environmental Management, vol. 292, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112752>

[41] J. Prasad, and R. K. Tripathi, "Energy harvesting from sediment microbial fuel cell to supply uninterruptible regulated power for



small devices," Rev. Int J Energy, vol.43, pp. 2821-2831, 2019.
<https://doi.org/10.1002/er.4370>

[42] J. Lawan, S. Wichai, C. Chuaypen, A. Nuiyen and T. Phenrat, "Constructed sediment microbial fuel cell for treatment of fat, oil, grease (FOG) trap effluent: Role of anode and cathode chamber amendment, electrode selection, and scalability," Rev. Elsevier, vol. 286, 21 July 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131619>

[43] E. Goleij, H. G. Taleghani, and M. S. Lashkenari, "Modified carbon cloth flexible electrode with ternary nanocomposite for high performance sediment microbial fuel cell," Rev. Elsevier, vol. 272, 1 November 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124961>

Derechos de Autor (c) 2022 Marlenne Feregrino-Rivas, Blenda Ramirez-Pereda, Francisco Estrada-Godoy



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



Automatización completa del procesamiento de los estudios de perfusión miocárdica con ^{99m}Tc -MIBI en SPECT

Complete automation of the processing of myocardial perfusion studies with ^{99m}Tc -MIBI in SPECT

Gerardo Luis Vázquez ¹, Roberto Galli ¹, Carlos G. Einisman ²

¹Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín, Martín de Irigoyen 3100 (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina.

²Programa de Estudios Posdoctorales. Universidad Nacional de Tres de Febrero, Juncal 1319, 3er piso (1062) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Autor de correspondencia: Gerardo Luis Vázquez, Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad Nacional de San Martín, Martín de Irigoyen 3100 (1650) San Martín, Buenos Aires, Argentina. Email: gerardovazquez00@hotmail.com. ORCID:0000-0001-9697-6232.

Recibido: 11 de septiembre del 2021

Aceptado: 21 de enero del 2022

Publicado: 31 de enero del 2022

Resumen. - *El estudio de perfusión miocárdica (EPM) en SPECT (Tomografía Computada por Emisión de Fotón Único) en esfuerzo y reposo con metoxi-isobutil isomitrilo marcado con Tecnecio 99 metaestable (^{99m}Tc -MIBI), es un procedimiento muy frecuente en medicina nuclear. El procesamiento manual del EPM se encuentra en gran medida estandarizado. Sin embargo, la intervención de distintos operadores durante el proceso de producción del diagnóstico médico –objetivo final de la práctica– da lugar a errores intra e inter-operador, disminuyendo la reproductibilidad de los resultados y aumentando la necesidad de reprocesamiento de los estudios. Por tal motivo, se propuso la automatización completa del procesamiento de los EPM. Para ello, se desarrollaron algoritmos y procedimientos automatizados empleando el programa MATLAB®. Los resultados obtenidos fueron positivos en los 52 estudios procesados, logrando automatizar el 100% de cada una de las etapas del procedimiento, obteniendo una total repetitividad de resultados y cortos tiempos de procesamiento con valores promedios de 15.8 segundos. Comprados con los valores obtenidos en los procesamientos manuales, el procedimiento desarrollado cumplió con los objetivos propuestos y permitirá el desarrollo de mejoras y nuevos algoritmos para la automatización de procedimientos, tanto en el área de la cardiología nuclear como en otros campos de aplicación de las imágenes médicas.*

Palabras Claves: SPECT; Perfusión miocárdica; Procesamiento de imágenes; Procesamiento automático.

Abstract. - *The study of myocardial perfusion (EPM) in SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) at stress and rest with methoxy-isobutyl isomitrile labeled with metastable Technetium 99 (^{99m}Tc -MIBI), is a very common procedure in nuclear medicine. The manual processing of the EPM is largely standardized. However, the intervention of different operators during the production process of the medical diagnosis –the final objective of the practice– gives rise to intra- and inter-operator errors, reducing the reproducibility of the results and increasing the need to reprocess the studies. For this reason, the complete automation of EPM processing was proposed. For this, algorithms and automated procedures were developed using the MATLAB® program. The results obtained were positive in the 52 processed studies, managing to automate 100% of each of the stages of the procedure, obtaining total repeatability of results and short processing times with average values of 15.8 seconds. Compared with the values obtained in manual processing, the developed procedure met the proposed objectives and will allow the development of improvements and new algorithms for the automation of procedures, both in the area of nuclear cardiology and in other fields of application of images. medical.*

Keywords: SPECT; Myocardial perfusion; Image processing; Automatic processing.



1. Introducción

La medicina nuclear es una tecnología que emplea ciertas sustancias radioactivas artificiales, conocidas como radiofármacos, para el diagnóstico, tratamiento y estudio de las enfermedades. Los estudios de perfusión miocárdica (EPM) de esfuerzo y reposo en SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) son uno de los procedimientos de diagnóstico más frecuentemente realizados en medicina nuclear, siendo una técnica mínimamente invasiva empleada para el estudio de la enfermedad coronaria [1]. Para la visualización del tejido cardíaco viable, actualmente se utiliza el metoxi-isobutil isomitrilo (MIBI) asociado a una sustancia radioactiva, el Tecnecio ^{99m}Tc metaestable (^{99m}Tc). Este complejo ^{99m}Tc -MIBI es administrado en forma endovenosa en cada una de las etapas: 1) reposo y 2) esfuerzo (o apremio farmacológico en su reemplazo, según corresponda).

Para la realización de los EPM se requiere de la utilización de equipamiento de alta complejidad, del manejo de técnicas y procedimientos avanzados y del concurso de profesionales altamente calificados. Si bien los procedimientos de adquisición y procesamiento empleados en los EPM se encuentran estandarizados, la intervención de distintos operadores durante los procedimientos produce errores intra e inter-operador, dando lugar a una disminución en la reproducibilidad de los resultados y el consiguiente reprocesamiento de los estudios. Por tal motivo, se propuso la automatización completa del procesamiento de los EPM, a fin de lograr una mayor estandarización y optimización de los procesos. Para ello, se desarrollaron algoritmos y procedimientos automatizados de procesamiento, dirigidos a identificar las diferentes proyecciones del ventrículo izquierdo en las imágenes planares, reconstruirlas tomográficamente, reorientar los planos cardíacos y presentar los resultados de los cortes en sus tres ejes cardíacos convencionales, alineándolos para la correcta

comparación entre los estudios de esfuerzo y reposo.

2. Materiales y Métodos

Para el desarrollo del presente trabajo, se empleó el programa MATLAB® de MathWorks Ink, versión 2012 [2]. El mismo se utilizó en una computadora personal Notebook HP® Pavillion x360, con procesador Intel® Core TM i5-7200 CPU, 8 Gbyte de memoria RAM, sistema operativo Windows 10® de Microsoft y paquete office compatible con dicha versión. Se realizaron 52 estudios de perfusión miocárdica de reposo y esfuerzo en SPECT, en un grupo de 26 pacientes con edades entre 43 y 83 años (84.6 % de sexo masculino y 15.4% de sexo femenino). Los estudios fueron adquiridos en una cámara gamma SPECT marca Picker®, modelo Prism XP 1000 con un solo cabezal detector, conectada a una computadora con el software Oddissey® con sistema operativo Digital Unix de 64 bits y sistema X-Windows. Los estudios fueron adquiridos en una serie de 30 proyecciones empleando una matriz 64 x 64 pixeles de 2 bytes por píxel, utilizando un arco de barrido de 180°.

2.1 Desarrollo del procedimiento para el procesamiento manual de los EPM

Se desarrolló una interface gráfica para el procesamiento manual de los EPM en MATLAB, la cual fue utilizada por tres operadores expertos durante tres sesiones diferentes, obteniéndose valores de ángulos de rotación para la reorientación de los ejes cardíacos y valores de la frecuencia de corte en la utilización de un filtro Butterworth en el procesamiento de cada uno de los casos analizados. Se estimó el error intra-operacional a partir de los datos obtenidos manualmente, para cada uno de los operadores. El cálculo del error de cada parámetro se basó en promediar la diferencia entre cada uno de los valores obtenidos en las distintas mediciones del operador y el promedio de sus tres mediciones. De la misma manera se calcularon los errores inter-operacionales, obteniendo un promedio



general para cada parámetro entre las diferencias entre los promedios de todos los operadores y el promedio de cada operador en forma individual.

Los valores promedio de los parámetros obtenidos en el procesamiento manual por los operadores expertos permitirán estimar los errores en la selección automatizada de la frecuencia de corte y los ángulos de reorientación de los ejes cardíacos. Éstos se calcularán como la diferencia entre los valores obtenidos automáticamente y los valores promedio totales obtenidos manualmente por los operadores para cada uno de los casos tal como se indica en la ecuación (1).

$$err_{Auto} = \sum_{i=1}^n \frac{|x-m|}{n} \quad (1)$$

Donde: x es la medición obtenida de forma automática para cada caso en particular; m es el promedio obtenido entre las 9 mediciones de los operadores expertos de forma manual y n el número total de mediciones.

2.2 Estructura general del procedimiento

El procedimiento desarrollado emplea algoritmos para la segmentación del ventrículo izquierdo (VI) [3,4], la reconstrucción tomográfica por retroproyección filtrada (RPF) [5, 6, 7] y la reorientación de los ejes cardíacos [8, 9]. La estructura general del procedimiento para el procesamiento automatizado se describe en la figura 1.

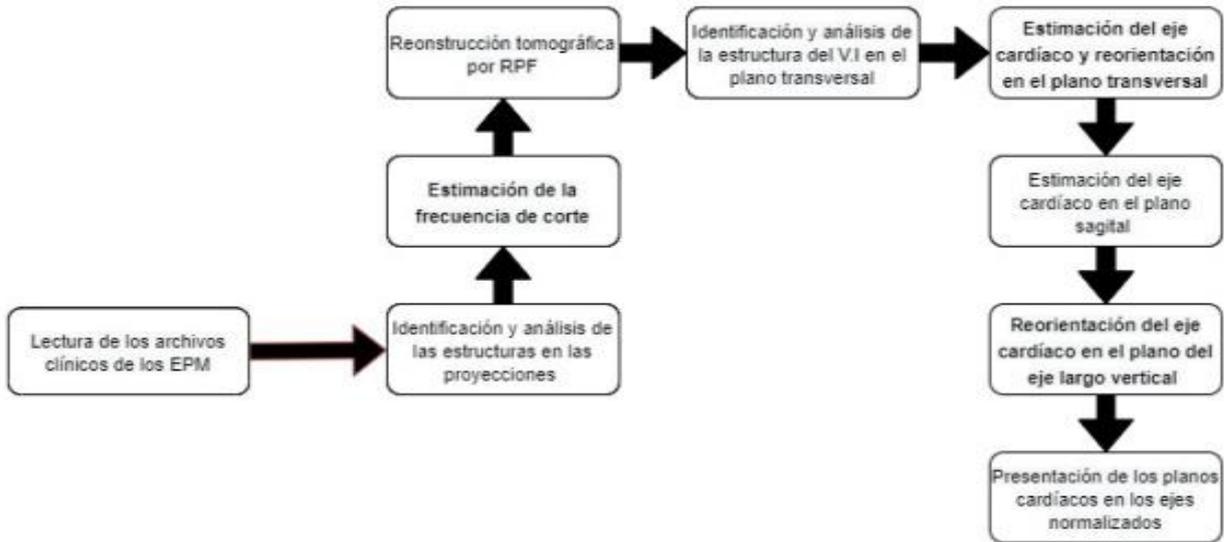


Figura 1: Diagrama de flujo del procedimiento para la confección del algoritmo. Fuente: Producción propia.

2.3 Identificación y análisis de la estructura del ventrículo izquierdo en las proyecciones

Se utilizó un algoritmo iterativo de segmentación por umbral con valor de umbral variable creciente, con el fin de identificar dentro del conjunto de objetos segmentados en cada iteración, aquella estructura que correspondiera con las características morfológicas del VI. Las características analizadas fueron las siguientes:

- Área
- Centroides en X e Y
- Perímetro

2.4 Estimación de la frecuencia de corte

Se calculó la frecuencia de corte (f_c) para cada caso de estudio de acuerdo con la ecuación (2). Donde: Cuentas Totales VI es la suma total de cuentas en la región del VI.

$$f_c = 0.3 + 0.05 * (\text{Cuentas Totales VI} / 10000) \quad (2)$$

La ecuación (2), definida como una función de las cuentas totales en el VI, fue estimada minimizando el error cuadrático medio de los valores promedio de frecuencia de corte obtenidos por los operadores expertos en el procesamiento manual de los EPM. En la Tabla 1, se muestran los datos del análisis del área de segmentación, utilizados para la estimación de la frecuencia de corte. Donde: “Cuentas totales” es la cantidad de eventos detectados por el SPECT en el área del VI; “Cuentas (media)” es el valor medio por píxel y “Cuentas (máx.)” es el valor máximo de cuentas por píxel, ambos en el área mencionada.

Tabla 1. Estadística de conteo en ventrículo izquierdo

Referencia	Cuentas totales	Cuentas (media)	Cuentas (Máx.)	Píxeles VI
Media	6688,46	55,83	85,38	124,79
DS	2593,54	19,78	27,35	35,06
Minimo	2052	18,41	33	48
Máximo	14324	101	149	175

2.5 Reconstrucción Tomográfica

Se realizó la reconstrucción tomográfica por el método de RPF, empleando un filtro Butterworth de orden 5 y frecuencia de corte ajustada de forma automática y para cada caso en estudio, obteniendo los cortes transversales para todo el volumen de reconstrucción y su sinograma tal como se muestra en la figura 2.

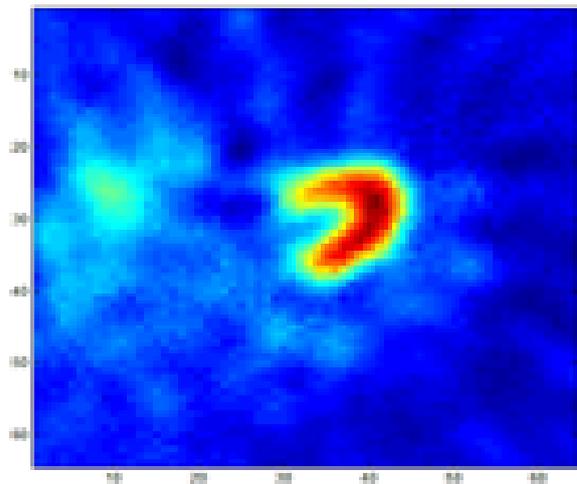
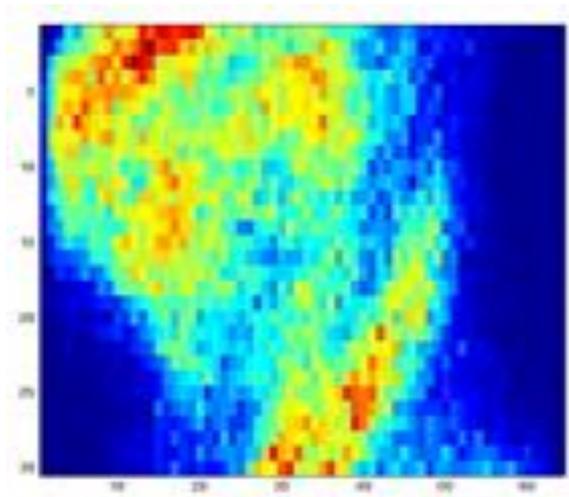


Figura 2: Representación del sinograma (izq.) y corte transversal reconstruido (der.) por el método de retroproyección filtrada. Fuente: Producción propia.

Una vez obtenido el volumen en el plano transversal, se seleccionó el corte que pasa por el centroide calculado en la etapa de identificación del VI, dado que ofrecía una buena delimitación de la estructura tanto en su cavidad como en su periferia. Se segmentó el VI en el plano transversal utilizando el método de segmentación por umbral de acuerdo con la ecuación (3).

$$U = \text{media}F + (\text{Max}F - \text{media}F)/3 \quad (3)$$

Donde: U es el valor de umbral empleado; media F y Max F son los valores medios y máximos de cuentas del objeto a segmentar.

2.6 Reorientación de los ejes cardíacos

Se analizó la estructura segmentada del VI de manera de identificar los planos apical y basal en el ventrículo. Para ello se calcularon los centros de masa y los puntos extremos de la



estructura del VI. Se identificó el plano apical mediante los puntos extremos 1 y 2 (círculos verdes) en la figura 3 y los puntos 3 y 4 (círculos blancos) determinando el plano basal. A continuación, se estimó el eje cardíaco a partir del cálculo de la recta que pasa por los puntos medios del plano del ápex y del plano basal (figura 3).

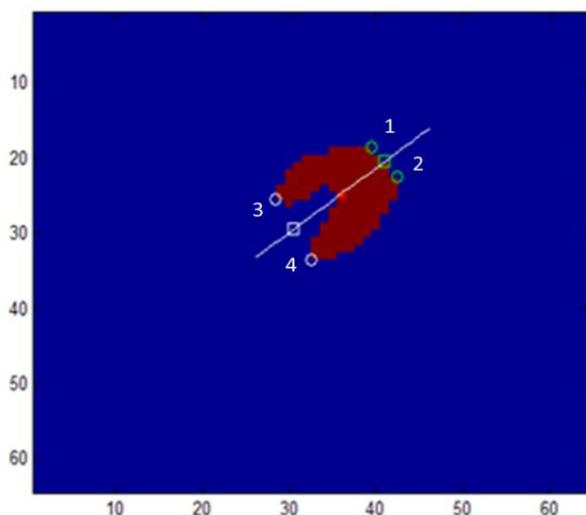


Figura 3: Ubicación de puntos del ápex y base con sus respectivos puntos medios, centroide y eje longitudinal del VI. Fuente: Producción propia, con base en MATLAB®.

Finalmente se calculó la pendiente de la recta y se reorientó el eje cardíaco llevándolo a la posición de 90° . Se registraron estadísticamente los ángulos de rotación calculados para cada uno de los casos clínicos analizados. Luego se procedió a reorientar todo el conjunto de cortes pertenecientes al plano transversal obteniendo el eje largo horizontal (ELH). En el volumen obtenido se logra visualizar el ápex cardíaco en la zona superior de la imagen y la base del VI en la zona inferior, tal como se muestra en la figura 4 (izq.).

Los cortes en el plano sagital fueron rotados de igual manera, analizando los puntos extremos del VI segmentado, calculando el ángulo de rotación del nuevo eje longitudinal cardíaco y llevándolo a la posición de 180° , obteniendo así el conjunto de cortes del eje largo vertical (ELV). A continuación, se procedió a reorientar la totalidad del volumen logrando visualizar el ELV tal como se muestra en la figura 4 (der).

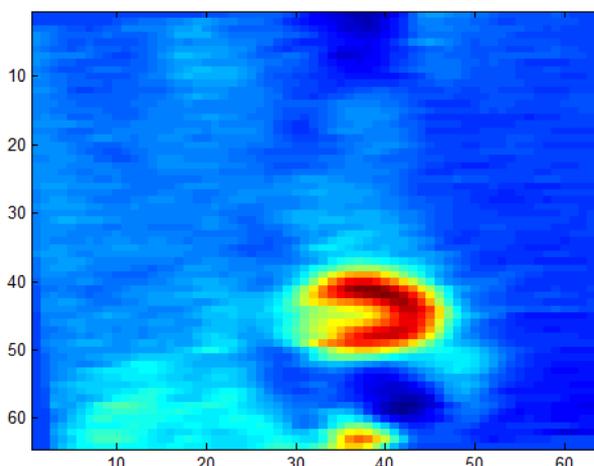
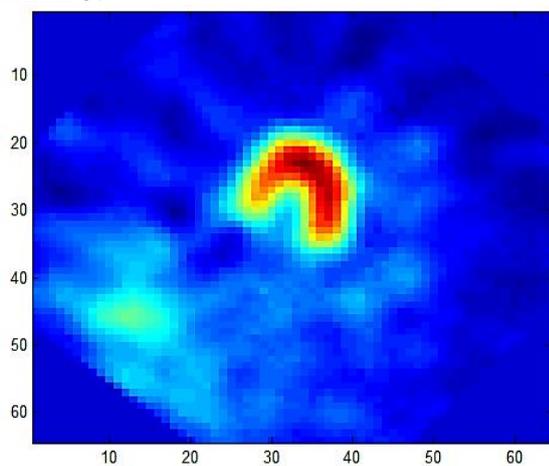


Figura 4: Representación de ELH luego del proceso de reorientación (izq.) y del ELV (der.). Fuente: Producción propia, con base en MATLAB®.

Para la obtención del eje corto (EC) se procedió a la redefinición de los planos y la reestructuración del volumen mediante la permutación del ELH, pudiéndose visualizar distintos cortes a determinadas alturas como se muestra en la figura 5.

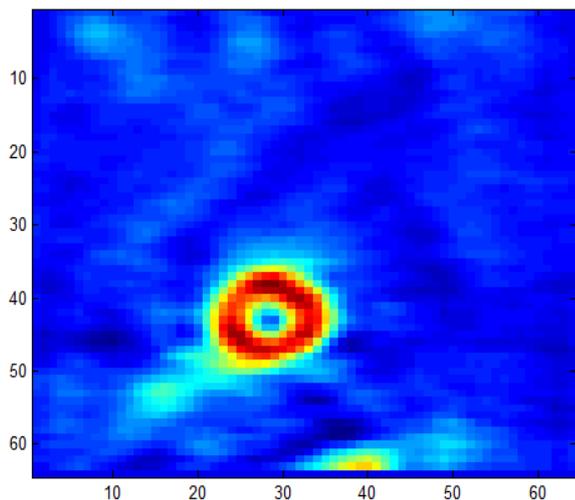


Figura 5: EC luego de la reestructuración de los planos. Fuente: Producción propia, con base en MATLAB®.

2.7 Presentación de los planos cardíacos

Los ejes cardíacos se presentan de forma estandarizada: EC; ELH y ELV. Los mismos se visualizan apareados mostrando el estudio de esfuerzo en la fila superior y el estudio de reposo en la fila adyacente inferior. Los cortes de EC se muestran desde el ápex a la base, presentando en el centro de la primera fila el corte correspondiente al plano que pasa por el centro de masa Y del ELH. Los cortes se centran en cada *frame* o cuadro, de acuerdo con la posición de su centroide. Los planos ortogonales son presentados definiendo 9 cortes, cuyo corte central corresponde al del centro de masa de cada uno de los ejes

cardíacos. A la izquierda del corte central se presentan los cuatro cortes adyacentes previos en dirección al ápex y a su derecha, los cuatro cortes adyacentes siguientes, en dirección a la base.

Los cortes del ELH se presentan de similar manera en la tercera y cuarta fila, desde la cara anterior hacia la inferior, con el centro de masa de VI en el eje Y, y los cortes de ELV en las 2 filas siguientes, desde el septum hacia la pared lateral, con el centro de masa de VI en el eje X. Cada uno de los planos cardíacos se presenta alineando los cortes de esfuerzo y reposo, a fin de mejorar la visualización comparativa del conjunto de planos en el EPM.

3. Resultados

3.1 Identificación y selección del VI

Se segmentó e identificó de forma automática el VI en los 52 casos analizados. En la figura 6, se muestran a la izquierda la proyección original; al centro las estructuras presentes luego de la segmentación y a la derecha, se muestra la estructura correspondiente al VI, cuyo tamaño y posición en el campo de visión es coincidente con los datos de referencia para lograr su identificación.

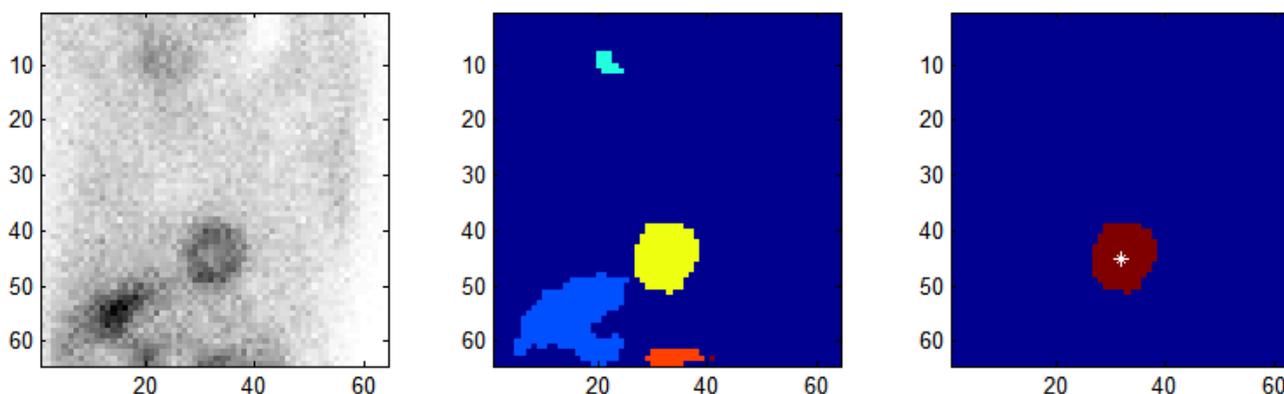


Figura 6: Izq: Imagen de proyección original. Centro: Segmentación de las diferentes estructuras presentes en la imagen. Der: VI identificado y aislado, presentando su centro de masa. Fuente: Producción propia, con base en MATLAB®.



De acuerdo con el análisis de los datos geométricos y espaciales obtenidos, se determinó que los valores de área y de los centroides fueron suficientes para identificar el VI.

3.2 Frecuencia de corte

Los valores obtenidos de la frecuencia de corte en unidades de Nyquist (Nyq) fueron correlacionados mediante la diferencia del valor absoluto entre las medidas manuales y las automáticas obteniendo valores promedios de 0.018 Nyq, los cuales se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de Fc manual vs Fc automática expresadas en Nyq.

Referencia	FC Man.	FC Auto	Dif(abs)
Media	0,280	0,276	0,018
DS	0,020	0,020	0,013
Mínimo	0,225	0,221	0,001
Máximo	0,340	0,318	0,051

3.3 Automatización de la reorientación de los ejes cardíacos

Los resultados obtenidos en el proceso de reorientación tanto del ELH y del ELV fueron exitosos. De los 52 casos, en 40 casos (76.93 %) fueron reorientados correctamente. En los 12 casos restantes (23.07%) se observaron algunos desvíos en la reorientación y sólo en 1 caso se observó una reorientación errónea del ELH y el ELV. Dentro de estos 12 casos, se observó una ubicación errónea de los puntos extremos producto de la hipoperfusión en algunos de los segmentos, lo cual significó una detección no representativa de los puntos extremos del plano basal y/o apical. Aún en estos casos, la mayoría de los valores obtenidos no presentaron grandes diferencias con los proporcionados por los expertos. En la tabla 3 se muestran los promedios de los valores obtenidos de forma automática en comparación con los valores promedios de todos los operadores.

Tabla 3. Valores promedio de estadística de conteo. Cuentas en VI

Referencia	Ángulo Automático		Ángulo Manual	
	ELH	ELV	ELH	ELV
Media	44,77	5,97	39,15	7,83
DS	4,91	7,69	8,03	5,52
Mínimo	32,01	-8,97	19,81	-0,92
Máximo	54,64	39,47	56,83	21,38

El error asociado a las mediciones mediante el procesamiento automático se calculó de acuerdo con la ecuación (1) y se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Errores asociados a mediciones automáticas

	ELH	ELV	Promedio
Error [°]	7,17	4,60	5,88

3.4 Automatización en la presentación final de resultados

En el total de las muestras analizadas se logró presentar de forma adecuada el 100% de los casos. La presentación final de resultados se muestra en la figura 7.

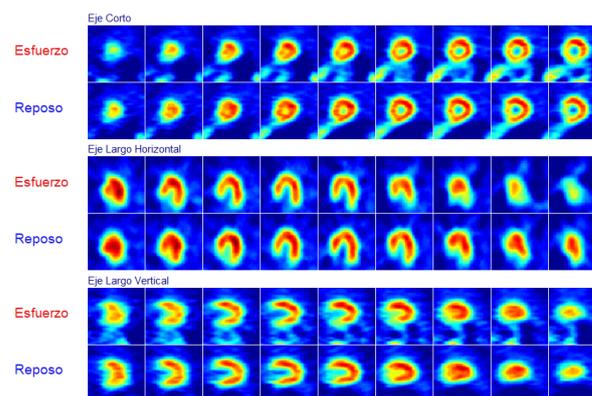


Figura 7: De arriba hacia abajo, EC, ELH y ELV en esfuerzo y reposo para su presentación final. Fuente: Producción propia, con base en MATLAB®.

3.5 Cálculo del tiempo de procesamiento

Mediante la utilización de comandos de MATLAB®, se tomaron datos de tiempo total de procesamiento conjunto de los EPM en



esfuerzo y reposo, el cual se computa desde que se abre cada uno de los archivos clínicos hasta la presentación de los cortes finales. Se obtuvieron valores mínimos de 9.08 segundos para el procesamiento total de un EPM y una media de aproximada de 15.8 segundos, mientras que la etapa de segmentación, se obtuvieron valores promedio de 4.86 segundos.

4. Conclusiones

Mediante el algoritmo propuesto se logró automatizar satisfactoriamente el procesamiento completo del EPM en los 52 casos clínicos estudiados, en aquellos pasos donde se producen errores imputables al operador. El procedimiento desarrollado permitió tiempos de procesamiento con un rango entre 9.08 y 24.28 segundos, con un valor medio de 15.77 segundos. Asimismo, se logró reducir los errores intra e inter-operador, mejorando la reproducibilidad de los resultados.

En las etapas de segmentación, análisis morfológico de las regiones e identificación del VI, tanto para las imágenes planares como en los cortes tomográficos, el algoritmo identificó y segmentó eficientemente el V.I en el 100% de los casos estudiados. La estimación de la frecuencia de corte en el proceso de reconstrucción tomográfica fue satisfactoria, obteniendo valores promedios comparativos entre la forma manual versus la automática de 0.018 Nyq. A su vez, los resultados obtenidos de la frecuencia de corte en el cálculo manual, arrojó una gran variabilidad de valores mostrando en uno de los casos datos promedio de 0.26, 0.23 y 0.28 Nyq, en contraste con los valores obtenidos de forma automática, donde la variabilidad puede ser considerada inexistente.

Asimismo, el algoritmo de reorientación del eje cardíaco, basado en un análisis innovador de las características morfológicas del VI, se obtuvo un error promedio de 7.17° para la reorientación del ELH y de 4.60° para el ELV. Si bien los valores obtenidos difieren del error promedio de 1.1° obtenido de forma manual

por los operadores expertos, la limitación en el cálculo para la reorientación de los ejes de forma automática se basó en 12 casos. Éstos presentaron ausencia de algún segmento del V.I por cardiopatía, lo cual conlleva a una detección de los puntos extremos no representativa del plano basal, apical o ambos, dificultando el cálculo del eje cardíaco.

Estos resultados indican la necesidad de realizar mejoras en el algoritmo, ampliando los valores de referencia con el análisis de una mayor muestra de casos clínicos. Como conclusión general, el algoritmo desarrollado cumple satisfactoriamente con los objetivos, ofreciendo además la posibilidad de desarrollar futuras aplicaciones en el campo de la automatización de procedimientos en cardiología nuclear o en el área de las imágenes médicas en general.

5.- Reconocimiento de autoría

Gerardo Luis Vázquez: Conceptualización; Metodología; Software; Validación, Análisis formal; Investigación; Recursos; Curación de datos; Borrador original; Revisión y Edición; Visualización. *Roberto Galli:* Conceptualización; Metodología; Software; Validación, Análisis formal; Investigación; Recursos; Curación de datos; Revisión y Edición; Visualización; Supervisión; Administración de proyecto. *Carlos G. Einisman:* Revisión y edición; Visualización; Supervisión.

Referencias

- [1] B. Zaret and G. Beller. Clinical Nuclear Cardiology. State of the Art and Future Directions. Elsevier, Mosby, EE. UU, 4th Edition, 2010, pp. 1-896.
- [2] Mathworks®. "Matlab". Available in: www.mathworks.com. ©1994-2021.
- [3] N. Otsu. "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," in IEEE Transactions on Systems, Man, and



Cybernetics, vol. 9(1), pp. 62-66, Jan. 1979.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.

[4] G. Germano, P. Kavanagh, M. Fish, M. Lemley, Y. Xu, D. Berman and P. Slomka. "Same-Patient Processing" for multiple cardiac SPECT studies. 1. Improving LV segmentation accuracy." *Journal of nuclear cardiology*, vol. 23 (6), pp. 1435-1441, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s12350-016-0673-2>.

[5] A. Hussani M and A. Al Hayani. "The Use of Filtered Back projection Algorithm for Reconstruction of Tomographic Image", *College of Engineering Journal*, Vol.17 (2), pp. 151-156, 2014.

[6] M. Lyra and A. Ploussi. "Filtering in SPECT Image Reconstruction", *International Journal of Biomedical Imaging*, Vol. 2011, pp. 1-14, 2011.
<https://doi.org/10.1155/2011/693795>.

[7] G. Germano. "Technical aspects of myocardial SPECT Imaging". *Journal of Nuclear Medicine*, pp. 1499-1507, 2001. PMID: 11585864.

[8] Z. He, J. Maublant, J. Cauvin and A. Veyre. "Reorientation of the Left Ventricular Long-Axis on Myocardial Transaxial Tomograms by a Linear Fitting Method". *Journal of Nuclear Medicine*, Vol. 32(9), pp. 1794-1800, 1991. Erratum in *Journal of Nuclear Medicine* 32(11), p. 2070, Nov 1991. PMID: 1880583

[9] G. Germano, P. Kavanagh, H. Su, M. Mazzanti, H. Kiat, R. Hachamovitch, K. Van Train, J. Areeda and D. Berman. "Automatic Reorientation of Three-Dimensional, Transaxial Myocardial Perfusion SPECT Images". *Journal of Nuclear Medicine*; Vol. 36, pp. 107-1114, 1995. PMID: 7769436

Derechos de Autor (c) 2022 Gerardo Luis Vázquez, Roberto Galli, Carlos G. Einisman.



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](#)



Diseño y desarrollo de máquina de desgaste tipo *pin on ring*

Design and development of *pin on ring* type wearing machine

Jesús Ángel Campuzano García , Mariano Braulio-Sánchez , José Eli Eduardo González-Durán ,
José David Díaz-Medina , Pedro Durán-Reséndiz 

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Educación Superior 2000, Benito Juárez, 38980
Uriangato, Guanajuato, México

Autor de correspondencia: Jesús Ángel Campuzano García, Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Educación Superior 2000, Benito Juárez, 38980 Uriangato, Guanajuato, México. E-mail: jesus2acg@gmail.com.
ORCID:

Recibido: 17 de septiembre del 2021

Aceptado: 18 de enero del 2022

Publicado: 10 de febrero del 2022

Resumen. - Se desarrolló una máquina de desgaste del tipo Pin On Ring, bajo la norma ASTM G99-17 (ASTM Int', 2018), que permite realizar ensayos mediante un procedimiento de laboratorio para determinar el desgaste de materiales. Las máquinas de desgaste tipo Pin On Ring requieren realizar pruebas a la pieza bajo ciertas condiciones como lo son: la velocidad de giro y la carga aplicada. En la máquina presentada se pueden manipular y controlar la velocidad de giro y la carga aplicada, gracias a que se incorporan los elementos necesarios para variar la velocidad del giro del motor, esto se logra a través de un variador de frecuencia, además se desarrolló un mecanismo de aplicación de carga que permite aplicar la carga deseada durante el ensayo, esta carga es medida gracias a una celda de carga que cuantifica la cantidad aplicada durante la prueba. Durante el ensayo se genera un incremento de temperatura entre las superficies, el cual se puede medir y observar su comportamiento en el panel de control de la máquina de desgaste mediante un sensor tipo k. Es posible obtener la tasa de desgaste de los materiales en contacto de manera automática, debido a que la instrumentación incorporada en la máquina permite calcular la distancia recorrida, con lo que se obtiene una idea del comportamiento del material bajo ciertas condiciones de trabajo.

Palabras clave: Pin on ring; Ensayos de desgaste; Tasa de desgaste.

Abstract. - A Pin on Ring type wear machine was developed, under the ASTM G99-17 (ASTM Int', 2018) standard, which allows tests to be carried out using a laboratory procedure to determine the wear of materials. This machine allows tests to be carried out using a laboratory procedure to determine the wear of materials. Pin On Ring type wear machines require testing the part under certain conditions such as: rotation speed and applied load. In the presented machine, the speed of rotation and the applied load can be manipulated and controlled, thanks to the incorporation of the necessary elements to vary the speed of the motor rotation, this is achieved through a frequency variator, it was also developed a load application mechanism that allows applying the desired load during the test, this load is measured thanks to a load cell that measures the amount applied during the test. During the test, an increase in temperature is generated between the surfaces, which can be measured and its behavior observed on the control panel of the wear machine by means of a type k sensor. It is possible to obtain the wear rate of the materials in contact automatically, because the instrumentation incorporated in the machine allows calculating the distance traveled, thereby obtaining an idea of the behavior of the material under certain working conditions.

Keywords: Pin on ring; Wear tests; Wear rate.



1. Introducción

Los ensayos de desgaste por deslizamiento permiten obtener información sobre el comportamiento tribológico de los materiales con el fin de diseñar, sintetizar y emplear el material que mejor satisfaga las necesidades de la aplicación en la cual será usado. Para esto es necesario analizar la respuesta del material bajo ciertas condiciones de carga, velocidad y distancia de deslizamiento a fin, de conocer la funcionalidad del material para determinada aplicación y así obtener las mejores propiedades tribológicas específicas deseadas [1].

Un tribómetro es el equipo mediante el cual es posible determinar la resistencia al desgaste de un material cuando se encuentra en contacto con otro y entre ellos existe movimiento relativo, en un determinado tiempo, bajo diferentes condiciones de carga, velocidad y distancia de deslizamiento.

Mediante un tribómetro es posible llevar a cabo distintas pruebas, por lo que los fenómenos de fricción, desgaste y lubricación son objeto de estudio de la tribología [2].

Una de las principales causas que limitan el uso de estos equipos, es su elevado costo, como prueba de ello se realizó la cotización de un Tribómetro tipo Pin-on-Disk (perno en disco) de la marca Anton Paar [3], cuyo costo asciende a \$1,200,000.00 MXN más IVA, cabe mencionar que se realizó la cotización de este tipo de tribómetro, porque los ensayos que se realizan con este equipo, también se rigen bajo la norma ASTM G99. Por lo tanto, si se compara con el costo de la máquina desarrollada se obtiene un ahorro del 78% aproximadamente, tal como se muestra el desglose de los costos en la Tabla 1.

Otro aspecto a considerar son las normas que rigen los ensayos y el tipo de muestras para las

que fueron diseñados, ya que, también corresponden a algunas de las limitaciones de los tribómetros. Por ejemplo, la Máquina de Disco sobre bloque ASTM G-77, en la cual, este método de ensayo cubre el procedimiento necesario para determinar la resistencia al desgaste ocurrido por el deslizamiento en diversos materiales.

Tabla 1. Cotización de la máquina *Pin on Ring* desarrollada. Fuente: Elaboración propia.

PRODUCTO O SERVICIO	No.	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
Motor Eléctrico	1	\$19800	\$19800
Variador de frecuencia	1	\$20000	\$20000
Perfil Bosch 45 x 45 mm	2	\$5224	\$10448
Perfil Bosch 45 x 90 mm	1	\$4800	\$9600
Mano de obra	384 hrs	\$500	\$192000
Celda de carga + Amplificador Hx711	1	\$220	\$220
Broquero para taladro de banco	1	\$1250	\$1250
Encoder rotatorio incremental	1	\$420	\$420
Termopar tipo K+ módulo Max6675	1	\$260	\$260
Varillas roscadas	2	\$235	\$470
Tornillos y tuercas	40	\$10	\$400
Escuadras	16	\$20	\$320
Guías de deslizamiento	4	\$110	\$440
Total			\$255628

Esta prueba utiliza un equipo de ensayo del tipo bloque sobre anillo para clasificar los pares de materiales de acuerdo con sus características de desgaste por deslizamiento. Una muestra colocada sobre un bloque estacionario es presionada con una fuerza constante contra un anillo giratorio a 90° del eje del anillo de giro. La fricción presente entre las superficies de deslizamiento bloque y anillo, resulta en la pérdida de material (volumen en milímetros



cúbicos), tanto para el anillo y el bloque. Los materiales con mayor resistencia al desgaste tendrán menor pérdida de material [4].

Por esta razón se vuelve complicado conseguir un equipo que se ajuste a ciertas necesidades específicas y en la mayoría de los casos al contar con un equipo de fabricación extranjera, no garantiza la ausencia de fallas, y tampoco que se cuenten con refacciones disponibles o personal capacitado para solucionar el problema en un corto tiempo [1].

Una de las alternativas a esta problemática es el diseño y fabricación mediante el uso de recursos propios. González Hernández et al. [2], diseñaron una máquina que consiste en una estructura, un mecanismo de fuerza y otro de movimiento. Con el desarrollo de esta máquina se permite estudiar las aplicaciones de la tribología para el desarrollo de nuevos materiales. En el trabajo realizado por Niebles Núñez et al. [5] diseñaron y construyeron una máquina de desgaste abrasivo basado en la norma ASTM G65, formulando cada una de las especificaciones requeridas para el diseño funcional. Las alternativas de diseño fueron evaluadas por el método de criterios ponderados permitiendo así establecer una alternativa de diseño conceptual y funcional.

Los ensayos tribológicos pueden realizarse en una gran variedad de formas las cuales no solo depende del par de materiales que se someten a estudio, sino que también dependen en gran medida del sistema mecánico en las que serán utilizados.

Es conveniente clasificar el comportamiento tribológico de los materiales dependiendo el grado de realismo, las propiedades del material, las condiciones reales de operación, tiempo y costo ya que para algunas pruebas o en algunos ensayos tribológicos la simulación no es una prioridad [1].

Los resultados de los ensayos tribológicos y los análisis de superficies ayudan a estimar y/o predecir el rendimiento tribológico de los materiales basados en diversos factores que influyen en ellos como la fricción, el desgaste, mecanismos de falla, la cinética de películas de transferencia, etc.

Para realizar las pruebas tribológicas mencionadas existen normas que se deben seguir, para que el ensayo tenga el alcance deseado y que, garantice su repetitividad en cualquier parte del mundo. La construcción de la máquina de desgaste de tipo *Pin On Ring* presentada en este trabajo se realizó bajo la norma ASTM G99-17 [2]. Esta norma establece que la cantidad de desgaste en cualquier sistema dependerá en general de la cantidad de factores del sistema, tales como la carga aplicada, las características de la máquina, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el entorno y las propiedades del material.

La norma ASTM G99-17 se ha utilizado en diversas investigaciones por ejemplo Asawthnarayan [6], para estudiar el efecto de variar la presión de abrasión en materiales compuestos. En el trabajo de Dairo et al. [7], analizan los materiales de ruedas y rieles que están expuestos a una gran cantidad de factores que afectan su desempeño, donde las pruebas de desgaste se llevaron a cabo utilizando un tribómetro de clavija sobre disco.

Otros ejemplos de aplicación es con Badheka [8], donde se estudió el comportamiento de desgaste de compuestos de superficie de aluminio reforzado con carburo de Boro. Una aplicación más es el de Heuberger, donde se investigó la viabilidad de utilizar poli-éter-éter-cetona (PEEK) en lugar de CoCrMo para los cón-dilos femorales de las prótesis de rodilla [9].



Las aplicaciones de la norma ASTM G99-17 no solo se limita a una rama en específico, por ejemplo, los resultados de Maculotti [10], muestran que los métodos topográficos mejoran la confiabilidad de la caracterización *Pin On Disk*.

En el trabajo de Shahroozi [11], se estudiaron la microestructura, la evolución de fase, la microdureza y la resistencia al desgaste de las capas de revestimiento mediante diferentes exámenes.

Otra aplicación es el trabajo de Arunkumar [12], donde realizó una prueba de desgaste por deslizamiento en seco utilizando un aparato de clavija sobre disco. Se siguió la norma ASTM G99 para el rendimiento óptimo de la prueba *Pin On Disk*.

Un trabajo de investigación que tuvo como objetivo la investigación experimental de las propiedades de corrosión y desgaste como resultado de un porcentaje variado de refuerzo según ASTM G99 para la prueba de desgaste por deslizamiento es el de Ravikumar [13].

Otro trabajo en el que se empleó la norma utilizada en el desarrollo de este trabajo fue el de Singh [14], donde las pruebas tribológicas se realizaron utilizando una configuración de pin en disco de acuerdo con la norma ASTM G99-17.

Por otra parte, Khuengpukheiw [15], estudió las propiedades mecánicas y los comportamientos de desgaste de los recubrimientos de NiSiCrFeB, WC-Co / NiSiCrFeB y WC-Co sobre acero AISI 1095.

En la investigación de Heuberger [16]. Las pruebas de desgaste de pasador sobre disco se realizaron utilizando pasadores hechos de UHMWPE articulados contra discos hechos de una aleación de CoCrMo. Las pruebas de

desgaste se realizaron utilizando dos fluidos de prueba diferentes: un líquido de prueba estándar utilizado para pruebas de simulador de cadera y un líquido sinovial sintético que contiene ácido hialurónico, albúmina, inmunoglobulina G, la lecitina fosfolípida y, además, azida sódica para combatir el crecimiento bacteriano.

En el trabajo de Thirugnanasambantham [17], se llevó a cabo el comportamiento de fricción y desgaste de las superficies de trabajo en contacto para examinar su tendencia durante el uso de una lubricación alternativa en el aceite mineral.

Waddad [18] presenta una estrategia multiescala para la simulación termo mecánica de sistemas de fricción, como frenos.

Por otra parte, los experimentos de *Pin On Disc* (PoD) se utilizan ampliamente para cuantificar y clasificar el desgaste de diferentes pares de materiales para cojinetes de implantes protésicos de cadera, tal es el caso de Borjali [19], donde se realizó con este fin.

En el artículo de Alvarez-Vera [20], se estudió el efecto del comportamiento tribológico de los polvos de relleno metálico a base de Ni con diferentes cantidades de nanopartículas de TiN o AlTiN. Se utilizó un tribómetro de clavija sobre disco para evaluar el comportamiento de desgaste y fricción del revestimiento duro en condiciones de revestimiento seco.

Un estudio realizado donde cuyo propósito ha sido investigar los efectos de los recubrimientos funcionales de TiAlN en experimentos criotribológicos *Pin On Disc* fue el de Rizzo [21]. En la actualidad, la introducción de nuevas tecnologías de mecanizado para el arranque de viruta, tanto a alta velocidad como en condiciones criogénicas, plantea nuevos retos y abre nuevos horizontes a la investigación.



Como se puede observar las aplicaciones de la norma ASTM G99 y el uso de los tribómetros Pin-on-Disk son amplios y para diferentes aplicaciones.

Es importante mencionar que el método de prueba *Pin On Ring* no intenta duplicar todas las condiciones que se pueden experimentar en servicio, por lo que no hay garantía de que la prueba predecirá la tasa de desgaste de un material dado en condiciones diferentes a las de la prueba que pueden experimentar en servicio.

El objetivo del presente proyecto es diseñar y fabricar una máquina para determinar el comportamiento al desgaste por deslizamiento de distintos materiales aplicados en la industria automotriz.

Un ejemplo de investigación en el ámbito automotriz es el Federici [22], donde argumentan que durante la conducción sin frenos, puede producirse algún contacto no deseado entre las pastillas de freno y los discos giratorios, lo que induce un uso ineficiente de combustible y una contaminación ambiental adicional. Este artículo aborda el comportamiento de fricción de 5 materiales comerciales de fricción NAO y de bajo contenido de metal que se deslizan en seco contra un disco de contracara de hierro fundido, bajo presiones de contacto bajas, típicas de la conducción sin freno.

De igual manera, el trabajo de Pacana [23], es un trabajo de investigación orientado a la industria automotriz, en el cual se desarrolló un método que permita presentar una combinación original de métodos que permitan determinar con precisión las principales causas de los problemas en los sistemas automotrices. El método se probó para detectar incompatibilidades de productos utilizados en la industria automotriz. El problema fue una grieta en los discos de conexión del pasador en el engranaje del motor al rectificar.

Después de utilizar el método combinado propuesto, se concluyó que la principal causa de este problema era el mal asentamiento de la muela sobre el producto [23].

La máquina de desgaste desarrollada es de bajo presupuesto en comparación con las existentes en el mercado, esto se debe en gran medida a que en la instrumentación de la máquina se incorporó el uso de *LabView* y *Arduino*. Entonces, con base a estas plataformas se eligieron los sensores capaces de cumplir con el objetivo de la máquina, esto con el fin de demostrar que con componentes de bajo costo se pueden realizar cosas interesantes y funcionales.

Algo que distingue la máquina desarrollada con lo existente en la literatura y/o mercado es su mecanismo de aplicación de carga, el cual permite tener incrementos de carga muy pequeños, simplemente girando las varillas roscadas que se encuentran en el mecanismo y en la mayoría de las otras máquinas la aplicación de la carga se realiza con la aplicación de pesas de cantidades comerciales, lo que hace más complicado aplicar una cantidad específica de carga, por ejemplo, hablando en términos de carga aplicada, comparando las cargas permisibles en otras máquinas ya desarrolladas y la máquina desarrollada en este trabajo se obtiene que, en el trabajo de Imani [24], se usaron cargas de 2.5 hasta 10 N, intervalo que cubre la máquina desarrollada en este trabajo por la celda de carga seleccionada.

De igual manera en el trabajo de Singh [25] donde la carga se elevó hasta 20 N, utilizando la misma norma ASTM G99-17 para estudiar el comportamiento de desgaste por deslizamiento en seco de un recubrimiento.



2. Metodología

La metodología empleada en el presente trabajo consta de los pasos mostrados en la Figura 1.

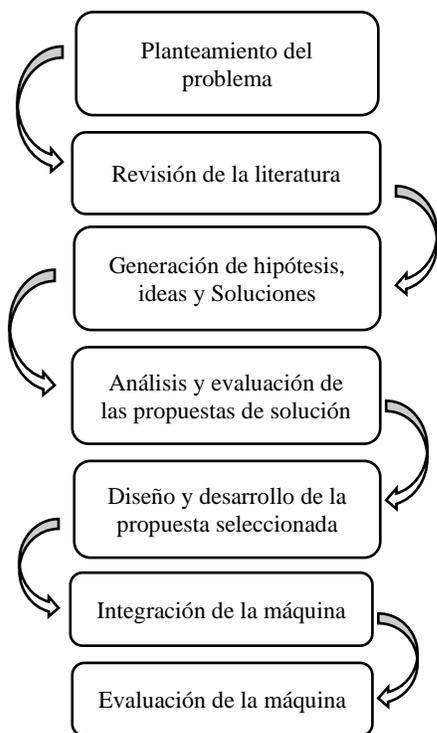


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología empleada en el desarrollo de la máquina. Fuente: Elaboración propia.

2.1 Diseño y desarrollo

Como primer paso se determinó el tipo de ensayos de desgaste que se quieren realizar, una vez definidos se investigó que norma rige estos tipos de ensayos y también las posibles máquinas de desgaste que cumplen con dichas especificaciones, por lo que se optó por el diseño y construcción de una máquina de desgaste del tipo *Pin on Ring*, bajo la norma ASTM G99-17 [26].

El segundo paso fue realizar una investigación documental en la que se estudiaron las variables que influyen directamente en la realización del ensayo, por lo que estas se deben de considerar

en el diseño y desarrollo de la máquina. Además, se estudiaron los tipos de máquinas de desgaste *Pin on Ring* existentes en el mercado y se analizó su funcionamiento.

Del análisis realizado se observó que algunas personas, instituciones educativas y/o compañías optan por desarrollar máquinas de desgaste *Pin On Disc* que se rige bajo la norma ASTM G99, pero cambia la configuración del perno sobre disco. Por ejemplo, David Teodoro Grau diseñó y desarrollo una máquina de desgaste *Pin On Disc para la UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA*, en la cual utilizo como unidad de control un Arduino Leonardo, para el movimiento tanto del *disk*, como de la mesa, uso dos tipos de motores, un motor a pasos y un servomotor, este último encargado de hacer girar el pin a altas revoluciones para someter a la probeta a las condiciones tribológicas adecuadas, este servomotor está controlado por un driver Lexium 28, que se encarga de controlar todas las señales del motor, pulsos, velocidad, par y de mostrar a través de un software específico [27].

El motor paso a paso se encarga de desplazar la mesa de trabajo a través de un husillo de bolas, este le permite girar a velocidades muy lentas, controladas y de forma precisa para que el desplazamiento de la mesa sea lo más preciso y silencioso posible. El motor paso a paso está controlado mediante un driver que recibe señales de Arduino y le da la tensión necesaria [27]. Además, fabricó en acero un soporte para sujetar el pin que ejerce la fuerza y para medir la aplicación de carga de igual manera utilizó una celda de carga [27].

Otro ejemplo correspondiente a los análisis de desgaste con discos *Pin On Disc* es el de Presin [28], donde estudiaron las propiedades de desgaste sobre un material compuesto de polímero reforzado.



Del estudio del análisis de las máquinas reportadas en la literatura y de acuerdo a la norma ASTM G99-17, se procedió a la selección de los componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos para el desarrollo de la máquina.

En la Tabla 2 se presentan las especificaciones del motor eléctrico de CA trifásico, de la marca ABB, modelo m2va80c-4, que se seleccionó para poder variar la velocidad de giro sin

comprometer el torque. Dentro de las características se mencionan los tipos de conexión (Conn) que se pueden realizar, la frecuencia (Freq) y el voltaje (Voltage) que maneja el motor dependiendo de la conexión realizada, a su vez la potencia (Power) y velocidad (Speed) que genera el motor, la corriente máxima (Current) y el torque (Torque) que genera.

Tabla 2. Especificaciones del motor eléctrico. Fuente: [29].

Conn	Freq (Hz)	Voltage (V)	Potencia (kW)	Velocidad (r/min)	Corriente (A)	Torque (N·m)
Y	60	440-480	0.90	1690	1.90	5.08
D	60	250-280	0.90	1690	3.30	5.08

Para controlar la velocidad del motor eléctrico se determinó utilizar un variador de velocidad, capaz de cubrir la velocidad máxima deseada y poder trabajar con la cantidad de corriente demandada por el motor, el variador de velocidad es el Variador de Velocidad Mitsubishi Electric FR-E720-050.

Una vez seleccionados los componentes eléctricos que ayudarán a cumplir con las especificaciones deseadas, se realizó el modelado mediante el uso de *SolidWorks* [30], que consiste en el desarrollo de una base o mesa para la máquina de desgaste, usando perfil Bosch. Durante su desarrollo se fabricaron escuadras a la medida del perfil y se usaron tornillos cabeza de gota, lo que generó un ahorro económico considerable si se compara con los costos de las escuadras y los tornillos para el perfil, realizando la misma función de sujeción y soporte.

En busca de garantizar la seguridad del usuario de la máquina de desgaste se diseñó una protección con perfil Bosch y acrílico que permita tener visibilidad hacia la parte interior, con el fin de poder monitorear el ensayo que se

esté realizando, además de generar un ambiente seguro alrededor de la máquina, cabe mencionar que esta base es removible.

El motor previamente mencionado se encuentra anclado a la mesa, para garantizar una correcta sujeción, además cuenta con un material entre la base y motor que ayuda a la absorción de vibraciones generadas por el motor. Para poder completar la máquina de desgaste es necesario el uso de un disco metálico con determinadas especificaciones de dureza, con el fin de que este sea el elemento que desgaste al Pin muestra del material que se desea ensayar.

La contraparte consiste en un disco de acero AISI D2 tratado térmicamente cuya composición química en peso: 1.5% C, 0.45% Mn, 0.3% Si, 12% Cr, 0.9% Mo, 0.03% P, 0.03 % S, 1.0% V, 83.79% Fe [31], la dureza del disco para desgaste se determinó mediante el uso de un durómetro Mitutoyo Mod MIC-963-210-100 obteniendo un valor promedio de 95 HRC, del cual algunas características se indican en la Tabla 3.

El acero AISI D2 tiene un gran uso en la industria manufacturera especialmente en la fabricación de



matrices debido a su alta dureza, resistencia y propiedades de desgaste [32], otras características y aplicaciones son mencionadas en la Tabla 3.

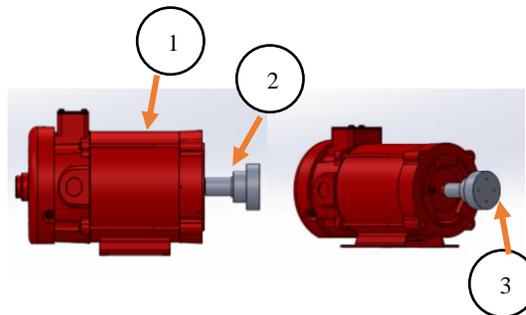
La dureza alcanzada se consideró como suficiente, debido a que en el Centro de Mecánica del Instituto Nacional de Tecnología Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora diseñaron y construyeron una máquina *Pin On Disc* bajo criterios de la norma ASTM G99, con el fin de la determinación de coeficientes de fricción y ejemplos de aplicación, en la que utilizaron un disco de acero SAE H13 templado y revenido a 45HRC, material empleado con esa dureza en la fabricación de matrices de forja, y pines mecanizados en tres aceros. Dicha máquina fue aplicada con éxito para determinar coeficientes de fricción, que fueron usados en la simulación de procesos de forjado en caliente [33].

Tabla 3. Material, características y aplicaciones, del material usado en el disco de desgaste. Fuente: [34].

Material	Características	Aplicaciones
Acero D2	Acero al alto carbón y alto cromo. Dimensionalmente estable de excelente rendimiento al corte y resistencia al desgaste. Especialmente apto para temple al aire.	Matrices y Punzones Herramientas de Roscado Partes de Desgaste Cuchillas, Slitters y Cizallas

La manera de acoplar el disco al eje del motor eléctrico consta del desarrollo de un cople, maquinado con las dimensiones adecuadas. Para garantizar el acoplamiento y la correcta rotación del disco para el ensayo debido a que la carga aplicada durante el ensayo de desgaste será directamente en el eje del motor.

En la Figura 2 se presenta el diseño CAD que muestra la ubicación de los tres elementos previamente mencionados.

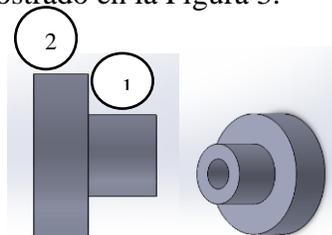


Descripción:

1. Motor eléctrico
2. Cople
3. Disco

Figura 2. Acoplamiento de los elementos de la máquina de desgaste. Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de fabricación del cople se utilizó una barra de aluminio de un diámetro de 65 mm, esta barra de aluminio se maquinó en un torno Pinacho ST 285 X 1500 con el que se obtuvo el modelo mostrado en la Figura 3.



Descripción:

1. Primera etapa de Maquinado
2. Segunda etapa de maquinado.

Figura 3. Diseño en CAD del cople motor-disco. Fuente: Elaboración propia.

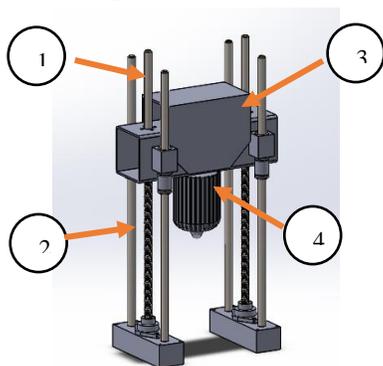
El modelo CAD consta de dos etapas de maquinado en torno, como se observa en la Figura 3, por lo que la generación del código también se dividió en etapas. Por motivos de simplicidad en el proceso de maquinado, se inicia con la parte donde se requiere de una mayor



remoción de material, en la Figura 4 esta sección se enumera con el número 1.

Por otro lado, se requiere sujetar el Pin muestra, por lo que se decidió usar un broquero de 1/32" a 5/8" con Árbol Cónico para Taladro de Banco Morse # 3 Montaje JT3, ya que este garantiza la sujeción de la muestra debido a que permite la apertura y cierre necesarios de acuerdo a las dimensiones de la muestra, este elemento se puede identificar en la Figura 4.

Para el mecanismo de aplicación de carga entre el Pin muestra y el disco, se cuenta con unos tornillos, que hacen la función de un tornillo sinfín para subir y bajar la base que sujeta a la porta muestra y a su vez aplicar la carga sobre el disco, además de que en este mecanismo se incorporan sensores que ayudan a la instrumentación de la máquina, que son: un sensor para medir la carga aplicada, así como un termopar tipo k que permite medir la temperatura que se tiene entre el disco y la muestra, al momento de realizar el ensayo. Estos elementos se visualizan en la Figura 4.

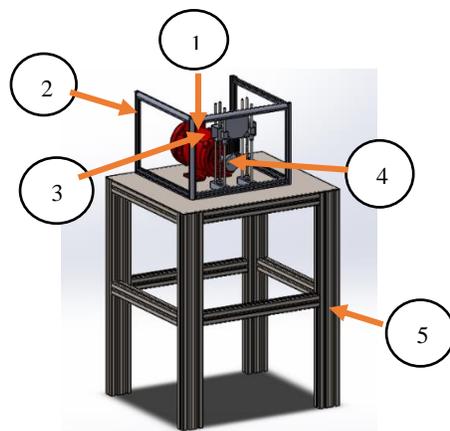


Descripción:

1. Varilla roscada de 1/2"
2. Guías de deslizamiento
3. Base para la celda de carga
4. Broquero de 1/32" a 5/8" con Árbol Cónico para Taladro de Banco Morse # 3 Montaje JT3

Figura 4. Mecanismo para la aplicación de carga y medición de la misma. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5, se muestra el modelado en CAD, en el que se incorporan todos los elementos mostrados previamente.



Descripción:

1. Motor eléctrico
2. Protección
3. Mecanismo de la aplicación de carga
4. Disco y cople

Figura 5. Modelado CAD de la máquina de desgaste. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Instrumentación

Para la instrumentación de la máquina de desgaste se optó por usar el Arduino Genuino Uno, con base a esta plataforma se eligieron los sensores y se desarrolló la programación, así como la conexión de los mismos.

La máquina requiere de un sensor capaz de medir la carga aplicada y para esta aplicación se eligió una celda de carga de 20kg con Amplificador Hx711, con una resolución de $1 \pm 0.15 \text{mv/v}$.

Por otra parte, es necesario conocer la temperatura que se tiene entre las superficies en contacto, esto se logra gracias al uso de un termopar del tipo K y un Módulo Max6675.

Para medir la velocidad de giro del motor se cuenta con un variador de velocidad, el cual



permite configurar la frecuencia con la que se desea opere el motor y con base a esta, configurar las r/min deseadas durante el ensayo de desgaste. Esto se logra debido a la implementación de un encoder con su sensor infrarrojo ubicado en el disco de desgaste, obteniendo así la velocidad a la que gira el disco y por ende el eje del motor.

El panel de control donde se visualizan los valores medidos por los sensores se desarrolló en *LabView*, en el que se muestra la velocidad a la que está girando el motor, la carga aplicada y la temperatura en las superficies en contacto.

Para poder establecer comunicación entre ambas plataformas se utilizaron las librerías *LVIFA_Base*.

Es necesario proceder a realizar la conexión de la celda de carga, amplificador y Arduino, como se muestra en la Figura 6.

Para que las señales generadas por la celda de carga puedan ser leídas por el Arduino, se requiere del uso del amplificador Hx711, gracias a que este amplifica la señal hasta el rango de valores necesarios para que el Arduino sea capaz de leerlo y sea posible tenerlo visible en el panel de control de la máquina de desgaste, este circuito permite saber la carga aplicada durante el ensayo.

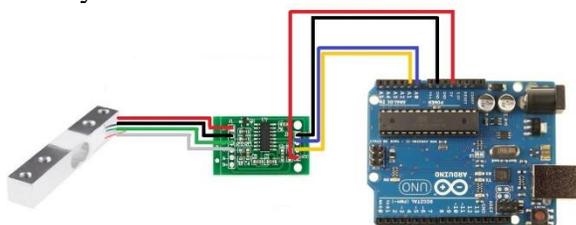


Figura 6. Conexión, celda de carga, amplificador Hx711 y Arduino. Fuente: Elaboración propia.

En el panel de control se puede visualizar la temperatura que se tiene entre las superficies en contacto, esto es posible gracias al uso de un

termopar compatible con Arduino y al módulo Max6675, en el cual se conectan las terminales del termopar a la entrada del módulo y a la salida de este se realiza la conexión a los pines del Arduino, como se ve en la Figura 7.

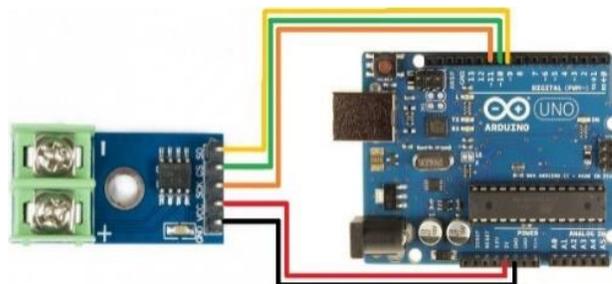


Figura 7. Conexión del Módulo Max6675 con el Arduino. Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la etapa de instrumentación se generó un programa en Arduino donde, es necesario descargar y llamar la librería “max6675.h” la cual es encargada de interpretar los datos leídos por el módulo, seguido de esto se definen las variables necesarias para el funcionamiento del programa.

Dentro del *Void setup* se inicia el puerto serial 9600 en el cual mostrara los datos obtenidos y ayudara para la comunicación serial con *LabView*, además se configuran los pines que se usaran en el Arduino.

Posteriormente se generó el programa en *LabView*, en el cual, se agregaron en el panel frontal 3 gráficos para la representación de las variables de interés, como las r/min , temperatura y la carga aplicada, también se encuentra el botón de “Stop” para detener el programa y el selector del puerto “COM” al que pertenece el microcontrolador a utilizar.

De manera paralela, al desarrollar la programación se generó el panel de control mostrado en la Figura 8, en el cual se cuenta con los indicadores correspondientes para cada sensor, de esta manera se satisface el monitoreo



de las variables de interés durante un ensayo de desgaste.

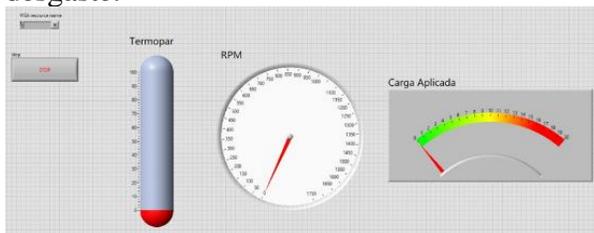


Figura 8. Panel de Control desarrollado en *LabView*.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Integración de la Máquina

Ahora en la máquina se integran todos los elementos mencionados previamente, comenzando por los elementos estructurales, como lo son la base de la máquina y la protección para el usuario, adicionalmente se incorporan en un panel de control físico, los elementos eléctricos y/o electrónicos, para poder encender el motor eléctrico. Al ser un motor trifásico, se requiere del uso de 3 pastillas ubicadas dentro de un centro de carga, cada una de estas pastillas controla una fase del motor.

Del centro de carga sale un cable con una conexión trifásica que debe alimentarse a 250-280 V, debido a que el motor está configurado en D (delta), especificaciones mostradas en la Tabla 1.

Para poder integrar y encender el variador de velocidad se debe de realizar la conexión pertinente entre el variador de velocidad y el motor eléctrico, de igual manera se debe agregar una clavija que permita tomar la tierra física, ya que, es necesaria para poder encender el variador de velocidad.

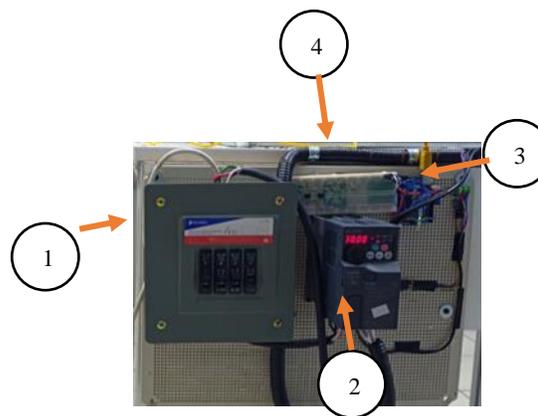
En el mecanismo de aplicación de carga se agregan sensores como la celda de carga y el termopar, posteriormente se instala el disco sobre el eje del motor y se coloca el encoder encargado

de realizar la medición de la velocidad a la que gira el motor.

Dentro del panel de control físico desarrollado se encuentra un Arduino Genuino Uno, en el cual, se realiza la conexión de los diversos sensores incorporados en la máquina.

Para poder alimentar los positivos (5V) de los sensores, así como, tomar las tierras (GND) necesarias para el funcionamiento de los sensores se incorporó un Protoboard para lograr ese fin.

El panel de control físico mencionado se muestra en la Figura 9.



Descripción:

1. Centro de Carga
2. Variador de frecuencia
3. Arduino Genuino Uno
4. Protoboard

Figura 9. Panel de Control Físico. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente con todos los elementos de la máquina integrados, se procede a realizar la calibración de los sensores, así como corroborar su correcto funcionamiento, realizando pruebas sencillas, como son girar el motor a una velocidad deseada y comprobar que la medición del encoder sea igual o cercana a esta, además se puede complementar con el uso de una muestra



cualquiera y ejercer un poco de fuerza sobre el disco de desgaste y observar si la celda de carga mide de manera correcta la fuerza aplicada.

Una vez hecho esto, la maquina esta lista para realizar un ensayo de desgaste en forma, con base en la norma ASTM G99 [26].

3. Resultados y Discusiones

A lo largo del desarrollo de la máquina se hicieron cálculos y simulaciones sobre elementos de la máquina, tal es el caso de la celda de carga en la cual, su diseño y correcto funcionamiento se basa en el de una viga en voladizo, por lo tanto, al ejercer una fuerza en uno de sus extremos y al tener la contraparte fija o anclada, esta debería sufrir una deformación, así que, se realizó una simulación en software calculando los valores correspondientes para una deformación total, en la cual, se seleccionó y sometió a análisis una pieza de material Aluminio y agrego una condición de fija o anclada en una de sus caras, del mismo modo, en la otra cara se aplicó una carga de -392.4 N , ya que se consideró el momento en sentido horario, las magnitudes utilizadas y su punto de aplicación se muestran en la Figura 10.



Figura 10. Diagrama de cuerpo libre de las piezas sometidas a simulación. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que la celda de carga tiene una capacidad máxima de 20 Kg , por lo que se decidió aplicar el doble de esta magnitud (40 Kg), que a su vez, convertida en “N” da la cantidad de 392.4 N , con el fin de analizar el elemento de la máquina en condiciones extremas

si se toma en cuenta su capacidad de carga, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 11.

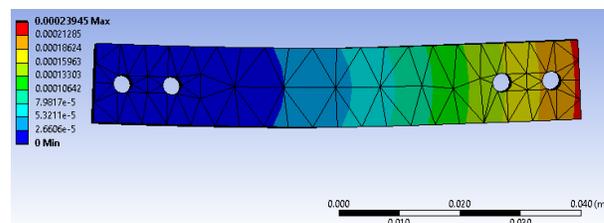


Figura 11. Deformación total de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 11, la fuerza aplicada está dentro de un rango seguro; adicionalmente se realizó una simulación de la misma pieza, con las mismas magnitudes, pero con otra variable de interés, que es el esfuerzo equivalente de Von Mises, ilustrado en la Figura 12.

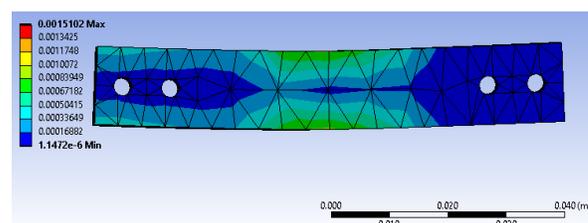


Figura 12. Esfuerzo Equivalente Von Mises de la celda de carga utilizada. Fuente: Elaboración propia.

Otro elemento que se somete a flexión debido a la naturaleza del diseño de la máquina es el eje del motor eléctrico, por lo tanto, se realizó la simulación correspondiente para calcular la deformación total en el eje del motor, en la que se consideró la misma magnitud de carga ilustrada en la Figura 10 (-392.4 N) y de igual manera con un extremo fijo, pero en este caso, lo que cambia con respecto al cálculo realizado para la celda de carga, es el material del cual se constituye el eje del motor, que en este caso es un acero AISI 1045 [35], el resultado se visualiza en la Figura 13.

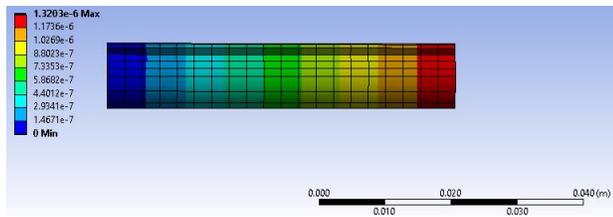


Figura 13. Deformación total del eje del motor ABB m2va80c-4. Fuente: Elaboración propia.

Llevando a cabo las etapas de diseño, desarrollo e instrumentación mencionadas en la metodología, se terminó la etapa de integración de la máquina, obteniendo como resultado un panel de control físico y el desarrollado en *LabView*, el resultado se visualiza en la Figura 14.



Figura 14. Máquina de desgaste *pin on ring* desarrollada. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó el funcionamiento de la máquina mediante la alimentación del motor eléctrico con un voltaje de 250-280 V y se configuró en el variador de velocidad una frecuencia de 30 Hz, alcanzando aproximadamente $1650 \text{ r}/\text{min}$ visibles en el panel de control en *LabView*, posteriormente se comenzó a aplicar gradualmente carga sobre el disco de desgaste mediante el mecanismo desarrollado, deteniéndose en un valor cercano a 12 kg, el resultado se visualizó en el panel de control en *LabView*, como reacción al giro del motor y la carga aplicada, el termopar tipo K realizó la

medición de temperatura cercana a 45°C en el Pin muestra utilizado, la prueba tuvo una duración de 15 minutos y se utilizó como Pin un taquete de madera para ajustes y puesta a punto de la máquina.

4. Conclusiones

4.1. Principales resultados

Se diseñó y fabricó una máquina de desgaste del tipo *Pin On Ring* con un sistema de control e instrumentación a través de un lenguaje de programación visual en *LabView*, con la implementación de *Solidworks* para el modelado CAD.

Se desarrollaron los elementos mecánicos y estructurales necesarios, como lo son la base de la máquina, una protección para el usuario, el anclaje del motor eléctrico. Se maquinó el cople en el torno CNC, el cual servirá para acoplarse al motor y fijar el disco de desgaste con el motor.

Se seleccionó el material del disco con las características requeridas de acuerdo a la literatura para poder realizar análisis tribológicos.

Se creó un panel en *LabView*, en el cual, es posible monitorear la velocidad a la que gira el motor eléctrico, además de que se puede ver la carga aplicada durante el ensayo de desgaste y una aproximación de la temperatura de las superficies en contacto.

4.1 Alcance y limitaciones

Se evaluó el funcionamiento de la máquina mediante un ensayo con fines de puesta a punto la instrumentación y funcionamiento de la máquina, para el correcto funcionamiento de la misma.



4.2 Trabajo a futuro

Como trabajo futuro se tiene el objetivo de realizar ensayos de desgaste, y comparar los resultados con los reportados en la literatura.

Como etapa final del desarrollo de la máquina se planteó la idea de implementar un sistema de visión artificial, con el objetivo de optimizar la realización de ensayos de desgaste, gracias a la obtención de imágenes en tiempo real y poder calcular la tasa de desgaste sin necesidad de quitar la muestra del ensayo.

5. Agradecimientos

Agradecemos al Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato y a la Coordinación de Ingeniería en Sistemas Automotrices por todas las facilidades otorgadas para la realización de dicho proyecto, de igual manera, agradecer al

encargado de laboratorio del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato, Cuauhtémoc Durán Alvarado, por el apoyo brindado y a todas las demás personas involucradas directa o indirectamente en la realización de este proyecto.

6. Agradecimiento de autoría

Jesús Ángel Campuzano García: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Análisis de datos; Borrador original. *Mariano Braulio-Sánchez:* Conceptualización; Ideas; Investigación; Análisis de datos; Escritura. *José Eli Eduardo González-Durán:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal. *José David Díaz-Medina:* Investigación; Análisis de datos; Escritura; Borrador original. *Pedro Duran-Reséndiz:* Revisión y edición; Administración de proyecto.

Referencias

- [1] GGB, «Tribología,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ggbearings.com/es/tribou/tribologia>
- [2] E. V.-C. a. F. N.-L. F. González-Hernández, «“Diseño de prototipo para pruebas de desgaste en superficies asfaltadas”,» Memorias del XIX Congr. Int. Anu. la SOMIM, no. Figura 1, , 2013, p. 193–200.
- [3] Anton Paar GmbH, «Tribómetro tipo pin-on-disk (perno en disco): TRB,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.anton-paar.com/mx-es/productos/detalles/trb3-tribometro-pin-on-disk/>. [Último acceso: 15 octubre 2021].
- [4] P. C. L. René Santiago Barral Becerra, «Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtención de curvas de fricción,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3079/Tesis.pdf?sequence=1>. [Último acceso: Junio 2021].
- [5] E. Esteban and N. Nu, «“Metodología para el diseño y construcción de una máquina para medición

- del desgaste abrasivo basado en la norma ASTM G-65”,» Prospectiva, vol. 7, no. 1, 2009, p. 53–58. <http://repositorio.uac.edu.co/handle/11619/1363>
- [6] B. M. H. M.S. Asawthnarayan, «Effect of abrasive friction on the wear behaviour glass – Epoxy Composites: Effect of nanographene, » Materials Today Proceedings, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.294>
- [7] I. A. V. C. M. A. G. G. P. S. T. E. A. G. H. Dairo H. Mesa G., «A pin-on-disk wear map of rail and wheel materials from different standards, » Materials Letters, vol. Volume 307, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131021>
- [8] K. V. J. Badheka, «Wear behavior of boron-carbide reinforced aluminum surface composites fabricated by Friction Stir Processing, » Wear, Volumes 426–427, Part B, pp. 975-980, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.041>
- [9] C. S. J. S. L. E. Roman Heuberger, «PEEK as a replacement for CoCrMo in knee prostheses: Pin-on-disc wear test of PEEK-on-polyethylene articulations, » Biotribology, Volume 27, 2021.



<https://doi.org/10.1016/j.biotri.2021.100189>

[10] E. G. G. G. L. M. M. G. Giacomo Maculotti, «Uncertainty-based comparison of conventional and surface topography-based methods for wear volume evaluation in pin-on-disc tribological test, » Tribology International, Volume 165, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107260>

[11] A. B. A. A. Shahroozi, «Microstructure and mechanical properties investigation of stellite 6 and Stellite 6/TiC coating on ASTM A105 steel produced by TIG welding process, » Surface and Coatings Technology, Volume 350, pp. 648-658, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.044>

[12] R. A. M. S. S. K. S. S. S. Arunkumar, «Optimization of wear behaviour of Al7075 hybrid metal matrix composites using Taguchi approach, » materials today, Proceedings, Volume 33, Part 1, pp. Pages 570-577, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.453>

[13] C. P. R. P. R. V. Ravikumar, «Corrosion and Wear Studies on LM6 Grade Aluminum - Cenosphere Composite – An Experimental Approach, » materials today proceedings, Volume 5, Issue 5, Part 2, pp. Pages 11667-11677, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.136>

[14] A. K. S. Y. K. S. K. C. R. M. Harvinder Singh, «Optimization of tribological behavior of AISI 4140 under nano fly ash particulates in engine lubricating oil, » materials today proceedings, Volume 45, Part 6, pp. pp 4619-4623, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.020>

[15] A. W. C. S. Ronnarit Khuengpukheiw, «Wear behaviors of HVOF-sprayed NiSiCrFeB, WC-Co/NiSiCrFeB and WC-Co coatings evaluated using a pin-on-disc tester with C45 steel pins, » Wear, Volumes 484–485, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203699>

[16] E. L. J. S. P. E. J. N. Roman Heuberger, «Shear resistance and composition of polyethylene protuberances from hip-simulating pin-on-disc wear tests, » Biotribology, Volume 23, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.biotri.2020.100139>

[17] T. K. R. Thirugnanasambantham, «Wear and friction characterization of chlorella sp. microalgae oil based blended lubricant on pin on disc tribometer, » Materials Today: Proceedings, Volume 33, Part 7, pp. Pages 3063-3067, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.512>

[18] V. M. P. D. G. d. S. Y. Waddad, «Multiscale thermomechanical modeling of frictional contact problems considering wear – Application to a pin-on-disc system, » Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02135267/document>. [Último acceso: 2021].

[19] K. M. B. R. A. Borjali, «Predicting the polyethylene wear rate in pin-on-disc experiments in the context of prosthetic hip implants: Deriving a data-driven model using machine learning methods, » Tribology International, Volume 133, pp. Pages 101-110, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.014>

[20] J. T.-M. H. H.-G. R.-A. A.-E. J.-D. M.-R. M. Alvarez-Vera, «Wear resistance of TiN or AlTiN nanostructured Ni-based hard facing by PTA under pin on disc test, » Wear, Volumes 426–427, Part B, Pages 1584-1593, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.096>

[21] M. G. M. M. D. D. G. P. Antonella Rizzo, «Validation of TiAlN functional coatings through cryo-tribological characterization using a pin-on-disk experiment, » Procedia CIRP, vol. 9, pp. 295-300, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.044>

[22] S. G. M. L. G. P. G. S. Matteo Federici, «A preliminary investigation on the use of the pin-on-disc test to simulate off-brake friction and wear characteristics of friction materials, » Wear, vol. 410–411, pp. 202-209, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.011>

[23] D. S. R. D. Andrzej Pacana, «Method of precise determination of the main causes of the problems on example of the pin connecting discs in an engine gear, » Transportation Research Procedia, vol. 55, pp. 683-690, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.036>

[24] H. Z. M. O. J. Z. P. C. J. Y. Z. Z. Abolhassan Imani, «Wear and friction of epoxy-based nanocomposites with silica nanoparticles and wax-containing microcapsules, » ELSEVIER, vol. 107, pp. 607-615, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.01.033>

[25] J. Singh, «Wear performance analysis and characterization of HVOF deposited Ni–20Cr₂O₃, Ni–30Al₂O₃, and Al₂O₃–13TiO₂ coatings, » Elsevier, vol. volume 6, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100161>



- [26] ASTM Int', «Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, » February 2018. [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/G99>.
- [27] D. T. GRAU, «Diseño y Desarrollo De Un,» Septiembre 2018. [En línea]. Available: <http://hdl.handle.net/10251/115391>. [Último acceso: Junio 2021].
- [28] D. C. Presin, «Experimental data on the properties of natural fiber particle reinforced polymer composite material,» materialtoday PROCEEDINGS, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.06.020>
- [29] ABB, «PRODUCT-DETAILS,» 2021. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/products/3GVA082002-ASB/3gva082002-asb>. [Último acceso: Junio 2021].
- [30] S. C. D. Systèmes, « “SolidWorks” Alemania,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.solidworks.com/>. [Último acceso: Junio 2021].
- [31] R. K. K. a. S. G. S. K. Singh, « “Microstructure evolution and abrasive wear behavior of D2 steel” Wear, » vol. 328–329, n° <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.019>, p. 206–216, 2015.
- [32] F. Q. Z. A. a. M. S. F. Mukhtar, « “Effect of chrome plating and varying hardness on the fretting fatigue life of AISI D2 components,» Wear, » vol. 418–419, n° <https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.12.001>, p. 215–225, 2019.
- [33] L. P. A. M. Martynenko, «Diseño y construcción de una maquina pin-on-disk para la determinación de coeficientes de fricción y ejemplo de aplicación,» s.f. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Krahmer/publication/280085064_Diseño_y_construcción_de_una_maquina_pin_on_disk_para_la_determinación_de_coeficientes_de_fricción_y_un_ejemplo_de_aplicación/links/55a7777c08ae0b4e87121f77/Diseño-y-construcción-de.
- [34] Aceros SISA, Servicio Industrial, S.A. de C.V, «Acero SISA D2,» 7 Junio 2021. [En línea]. Available: <http://www.sisa1.com.mx/pdf/Acero%20SISA%20D2.pdf>.
- [35] Was Sheng Enterprise Co., Ltd, «Eje De Eje De Motor Eléctrico De Metal,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.wassheng.com.tw/es/product/Shaft-SHT-05.html>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [36] S. Barral, «Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtención de curvas de fricción,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3079/Tesis.pdf?sequence=1>

Derechos de Autor (c) 2022 Jesús Ángel Campuzano García, Mariano Braulio-Sánchez, José David Díaz-Medina, José Eli Eduardo González-Durán, Pedro Durán-Reséndiz



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](#)



Caracterización del estilo de vida a partir del consumo de energía eléctrica y las prácticas proambientales de los hogares de la ciudad de Mexicali, B.C.

Characterization of the lifestyle based on the consumption of electrical energy and the pro-environmental practices of households in the city of Mexicali, B.C.

David Alejandro Becerril ¹, Judith Ley García ²

¹Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Boulevard Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, Baja California, México

²Instituto de investigaciones sociales, Universidad Autónoma de Baja California, Boulevard Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, Baja California, México

Autor de correspondencia: David Alejandro Becerril, Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Boulevard Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, Baja California, México. E-mail: becerrild@uabc.edu.mx. ORCID: [0000-0002-1132-4524](https://orcid.org/0000-0002-1132-4524)

Recibido: 21 de octubre del 2021

Aceptado: 21 de enero del 2022

Publicado: 07 de febrero del 2022

Resumen. - Los estados de la frontera norte de México destacan por los elevados niveles de consumo de energía eléctrica, sobre todo los que se ubican en zonas áridas donde existe la necesidad de utilizar aparatos de climatización, a razón de que un habitante de esta zona consume tanta energía en un mes de verano como el resto de los usuarios del país consume en un año, tal es el caso de la ciudad de Mexicali, B.C. la cual presenta una estructura singular y compleja de consumo eléctrico producto de aspectos relacionados con su contexto fronterizo y climático que se refleja en un impacto económico, social y ambiental producto de la manera en la que se consume la energía eléctrica, sobre todo en los meses de verano. Por lo anterior, resulta importante investigar sobre formas para reducir el consumo de energía eléctrica en la ciudad. Como respuesta a la problemática, se han realizado algunos estudios que observan el fenómeno desde dos perspectivas, una relacionada con los aparatos que utilizan energía eléctrica y otra relacionada con los usuarios, desde esta perspectiva destacan los estudios que han indicado que existe una clara relación entre los estilos de vida y el consumo de energía eléctrica así como las prácticas proambientales de los hogares, de tal manera que este trabajo se centra en este aspecto. Para lograr lo anterior, se utilizó un acercamiento de corte cuantitativo a través de un cuestionario aplicado a 273 hogares de Mexicali. Entre los principales resultados se encontró que existen tres tipos de estilos de vida. En cada estilo de vida existe un interés similar pero diferenciado tanto por el ahorro de energía eléctrica como por las prácticas proambientales. El comportamiento del usuario al utilizar los aparatos eléctricos es clave en las prácticas de ahorro de energía que se realizan en los hogares. Existe un gran desconocimiento acerca del consumo eléctrico y poca participación en los programas de ahorro de energía eléctrica en los hogares analizados.

Palabras Clave: Estilos de vida; Sustentabilidad; Consumo de energía eléctrica.

Abstract. - The states of the northern border of Mexico stand out for their high levels of electricity consumption, especially those located in arid areas where there is a need to use air conditioning devices, it's remarkable that in some cases an inhabitant of this area consumes as much energy in a summer month as the rest of the country's users consume in a year, such is the case of the city of Mexicali, B.C. which presents a unique and complex structure of electricity consumption product of aspects related to its border and climate context that is reflected in an economic, social and environmental impact product of the way in which electricity is consumed, especially in the months of summer. Therefore, it is important to investigate ways to reduce electricity consumption in the city. As a response to the problem, some studies have been developed to observe the phenomenon from two perspectives, one related to electronic devices and the other related to users, from this perspective, stand out studies have indicated that there is a clear relationship between consumption of electrical energy, pro-environmental practices, and the lifestyles, in a such a way that this work focuses on this aspect. To achieve this, a quantitative approach was used through a questionnaire applied to 273 homes in Mexicali. Among the main results, it was found that there are three types of lifestyles. In each lifestyle, there is a similar but differentiated interest both in saving electricity and in pro-environmental practices. User behavior when using electrical devices is key to energy-saving practices in homes. There is a great lack of knowledge about electricity consumption and few participation in electricity-saving programs in the households analyzed.

Keywords: Lifestyle; Sustainability; Electrical energy consumption.

1. Introducción

El tema de la energía se encuentra estrechamente ligado con el desarrollo de los países y la protección del medio ambiente, ambos temas globales, en este sentido, la energía es considerada el motor del crecimiento económico de las naciones, y a la vez, su producción es una de las principales causas de la degradación del medio ambiente a nivel global [1].

La energía tradicionalmente ha sido aprovechada por el hombre para alimentar todo tipo de máquinas y equipos producto de los avances tecnológicos, tal es el caso de la energía eléctrica que en la actualidad se integra de diversas formas a muchos aspectos de la vida diaria, por una parte, representa fuerza de trabajo y producción (al transformarla en fuerza motriz de máquinas y equipo), por otra parte, facilita el llevar a cabo algunas tareas (por ejemplo, en los hogares facilita las tareas domésticas y permite llevar a cabo actividades de recreación) y en específico, en lugares con climas extremos se puede considerar como un recurso que permite lograr condiciones de confort adecuado para que los habitantes de estos lugares lleven a cabo sus actividades cotidianas [2],[3]; por lo tanto, es posible considerar que la sociedad contemporánea basa gran parte de sus actividades cotidianas en el uso de la energía eléctrica.

Debido a lo anterior, se prevé que a nivel internacional el consumo de energía eléctrica aumente en promedio 2.7% de manera anual durante las dos primeras décadas del presente siglo, ante tal escenario se reflexiona sobre las consecuencias del uso inadecuado del recurso energético, por una parte, el impacto al ambiente afectando la calidad del aire, el agua y la tierra debido a que la energía eléctrica es producida principalmente a partir de recursos fósiles y limitados como el carbón, gas natural y derivados del petróleo, por otra parte, mantiene una estrecha

relación con aspectos económicos puesto que la variación en el precio de estos recursos limitados repercute en el precio de la energía eléctrica, éste aumento en el precio del recurso energético ocasiona impactos en el poder adquisitivo de los consumidores limitando su acceso a otros bienes y servicios (salud, recreación, e incluso confort) [3],[4].

A partir de las formas de producción y consumo de la energía eléctrica, el sector eléctrico se encuentra experimentando un proceso de cambio que afecta directamente el patrón de consumo y que genera incertidumbre sobre la disponibilidad energética de largo plazo; de acuerdo con algunos académicos sólo es posible estimar un rango de resultados, afectados por predisposiciones económicas, tecnológicas y juicios sociales [5],[6]. No obstante, para aclarar el panorama de la presencia futura del recurso energético se considera fundamental la conservación del recurso, vigilar el manejo de la carga y utilizar nuevas fuentes de energía [7].

Con base en lo anterior es posible decir que el desarrollo a futuro del consumo de energía eléctrica se determinará no sólo mediante aspectos cuantificables (técnicos y económicos) sino también por aspectos de carácter social (preferencias y juicios sociales); de acuerdo con algunos estudios [8], el consumo de energía eléctrica, puede ser englobado desde dos perspectivas:

- Dirigida a los aparatos eléctricos o hacia aspectos técnicos; referentes a la cantidad de energía eléctrica consumida medida en función de los KWh consumidos.
- Dirigida a los usuarios o aspecto social; referente al empleo de la energía eléctrica como un bien para satisfacer necesidades humanas, así como gozar de un bien de consumo.

Desde esta última perspectiva se considera que los aspectos de carácter social influyen principalmente en el consumo de energía eléctrica, porque, a pesar de que la energía es consumida a través de los diversos aparatos eléctricos al momento de funcionar, son los usuarios quienes marcan la forma en la que se utiliza el aparato; esta dualidad técnico – social ha ocasionado que enfrentar la problemática del consumo energético resulte complejo, como respuesta ante tal problemática se han elaborado estudios abordando uno o ambos aspectos (técnicos y sociales) con el objetivo de explicar en mayor o menor medida el consumo de la energía eléctrica [4],[6].

2. Antecedentes

Desde la perspectiva técnica, los estudios de consumo de energía eléctrica se caracterizan por enfocarse en explicarlo a partir de aspectos mayormente cuantificables. Un ejemplo de este tipo de estudios expone que la mejor forma de analizar el consumo de la energía en el sector residencial es a través del conocimiento del crecimiento del producto interno bruto al precio de la energía, el crecimiento de la población y las mejoras tecnológicas, principalmente porque llevar a cabo un análisis del consumo a partir de los usuarios lo hace muy complicado al implicar análisis de variables sociales, económicas, políticas y tecnológicas [9].

Los estudios a partir de la perspectiva técnica [4, 6, 10, 11] también atribuyen el consumo de energía eléctrica a aspectos como la cantidad de personas que integran un hogar y su ingreso económico; características de la vivienda como el tamaño, número de habitaciones, materiales que la conforman y si cuenta o no con acondicionamiento para confort térmico; presencia de electrodomésticos y aparatos eléctricos (entre ellos los de acondicionamiento ambiental) en la vivienda en cantidad y eficiencia relacionada a la condición de adquisición y antigüedad del equipo;

el precio de la energía; el impacto de las altas temperaturas en lugares con climas extremos e incluso frecuentemente se incorporan simulaciones térmico – energéticas.

Estos estudios [9, 10, 12, 13], han aportado conocimiento valioso respecto a algunas formas de disminuir el consumo de energía eléctrica, por ejemplo, para el sector residencial, se plantean estrategias con la finalidad de mejorar aspectos de confort térmico de la vivienda por medio del aislamiento térmico así como sellado de puertas y ventanas para reducir infiltraciones de calor externo; reducir la carga energética producto de los aparatos eléctricos como el aire acondicionado –que en el caso de la refrigeración de paquete aumenta en promedio tres veces la media general de consumo de energía eléctrica–, utilizar aparatos eléctricos de alta eficiencia –ya que a mayor antigüedad del aparato mayor consumo de energía eléctrica– entre ellos principalmente la iluminación, el refrigerador y la televisión.

A partir de lo anterior, es evidente que los estudios realizados desde la perspectiva técnica se relacionan estrechamente con estrategias para disminuir el consumo de energía eléctrica a partir del enfoque sobre aspectos como las características de las viviendas, de los aparatos eléctricos utilizados en ellas y el acondicionamiento ambiental utilizado.

Como producto de estos estudios realizados, se han retomado algunas ideas con la finalidad de implementar planes y proyectos a nivel urbano para disminuir el consumo de energía eléctrica de los hogares, por ejemplo, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) instrumentó en 1989 el Programa de Ahorro de Energía del Sector Eléctrico (PAESE), cuyo fin era evaluar la tecnología para el ahorro de energía y formar recursos humanos para concientizar y orientar a los usuarios sobre el uso eficiente de la energía

eléctrica por medio de folletos informativos mediante los cuales se invitaba a la población a sustituir aparatos eléctricos en mal estado y cambiar bombillas incandescentes por fluorescentes; posteriormente en 1990, la CFE estableció el Programa de Apoyo a la Economía Familiar y de Ahorro de Energía Eléctrica para Mexicali, programa del cual derivó el Fideicomiso para el Programa de Aislamiento Térmico de Vivienda en el Valle de Mexicali, B.C. (FIPATERM) cuyo objetivo era lograr el ahorro de energía eléctrica a través del aislamiento de las viviendas, en este mismo año se crea el Fideicomiso para el Ahorro de Energía Eléctrica (FIDE) con el propósito de modificar los patrones de consumo de energía eléctrica y demostrar que el ahorro de energía es factible y aporta beneficios económicos y sociales; en 1997, CFE instituyó el programa de Ahorro Sistemático Integral (ASI) el cual tenía como objetivo sustituir los aparatos de acondicionamiento ambiental, refrigeradores y focos por equipos y aparatos de una mayor eficiencia apoyando la sustitución por medio de un financiamiento para adquirir estos equipos [4].

Ahumada y Sáñez [2] exponen que por medio de estos programas se ha buscado disminuir el gasto excesivo de electricidad, se han tomado ventajas de horarios claves en el consumo, se han establecido acciones de investigación para identificar potenciales de ahorro y se ha facilitado la adquisición de algunos aparatos eléctricos para los usuarios; sin embargo, los resultados no han sido los esperados por parte de CFE ni por parte de los usuarios, debido principalmente a que todos los programas requieren una inversión que en casos particulares no es posible realizar por parte del usuario, sumado a esto, los programas parecen poco atractivos hacia los usuarios porque son considerados poco prácticos, además de que no ofrecen una explicación clara del porqué de la diferencia en los consumos de energía eléctrica en hogares similares que habitan en viviendas similares.

Los resultados no satisfactorios de los planes y programas, así como la duda planteada sobre la diferenciación de consumo puede ser atribuible a que este tipo de trabajos han dejado de lado al usuario como un elemento importante, en este sentido, en un estudio elaborado por Raaij *et al.* [14]. Se menciona que es imposible separar el comportamiento del usuario si se estudia el consumo de la energía eléctrica en la vivienda porque el consumo es resultado de características físicas y técnicas, así como el comportamiento de los habitantes; por lo que es necesario atender todos los factores que ocasionan el aumento de consumo de energía entre ellos el comportamiento del usuario.

La importancia de estudiar el consumo de energía eléctrica a partir de los usuarios se demuestra cuando se observa la gran cantidad de variaciones en el consumo que sugieren que no es la localización, el clima, los materiales de la vivienda lo único que establece el modo de vida, sino también los cambios y diferencias producto de factores sociales, culturales, rituales, económicos y físicos, factores que cambian de forma gradual con el paso del tiempo [15].

Desde esta perspectiva, se han realizado propuestas dentro de las que se incluyen realizar cambios en los estilos de vida de los usuarios así como se ha recalcado la necesidad de concientizar e incentivarlos, para ello, Ahumada y Sandez comentan que se requieren estudio profundos que sean "...encaminados a corregir rasgos en la conducta de usuarios de todos los niveles sociales, cuya repercusión sea el ahorro de energía y un beneficio económico para todos los involucrados" [2, p. 40], pero sin perder de vista que el comportamiento social se ve modelado también por las características biológicas del ser humano [16], lo cual hace el estudio del fenómeno todavía más complejo.

En este sentido, se han llevado a cabo otro tipo de estudios [4, 6, 14, 17] que abordan el consumo de energía eléctrica desde una perspectiva social enfocada principalmente en los usuarios. De acuerdo con estos estudios, el comportamiento del consumo eléctrico es producto de diversas variables sociales y culturales [6]; entre ellas destacan los patrones de comportamiento de consumo eléctrico producto de la forma o estilo de vida de los usuarios, de sus hábitos, preferencias, actitudes, valores, creencias, significados simbólicos, comunicación y convivencia influidos por el contexto social, económico, cultural y psicológico que rodea al ser humano. También mencionan la importancia de considerar características como el ciclo de vida de la familia, su estructura, nivel de ingreso en los hogares, el precio de la energía y la influencia de la psicología de la escasez en el comportamiento y la toma de decisiones de los usuarios para aceptar o no su participación en programas de ahorro y planes basados sólo en aspectos técnicos.

A partir de los trabajos realizados con base en las variables sociales mencionadas, se han podido identificar en primer lugar, que los usuarios desconocen la información, y aun cuando la tienen al alcance en ocasiones es incompleta, por lo que no es considerada debido a falta de comprensión, desconfianza, e ideas preconcebidas y equivocadas sobre el uso de aparatos eléctricos (por ejemplo, la sobre/subestimación de la cantidad de energía eléctrica que consumen). La información entonces debe estar en un formato comprensible, atractivo y constante a través de diversos medios ya que la información exacta se asimila socialmente de forma lenta y gradual, en este sentido la información siempre y cuando sea entendible y confiable ocasiona un efecto sobre la toma de decisiones que influyen sobre el consumo eléctrico.

Por otro lado, se ha expuesto que el nivel de ingreso de los usuarios influye en los hábitos de consumo de energía eléctrica (forma y tiempo en la que se utilizan los aparatos); a cada nivel de ingreso el uso de cierto tipo de aparatos es predominante [6], donde, a mayor ingreso se presenta un mayor consumo sobre todo en época de verano, siendo entonces los usuarios que tienen menos posibilidades de ahorro de energía eléctrica los que reciben un mayor impacto social, a ingreso bajo, menor acceso al ahorro energético si se toma tal y como lo plantean los estudios desde la perspectiva técnica. Y finalmente, se ha encontrado que el comportamiento de los usuarios en relación al uso de energía es identificable principalmente en tres actividades, al adquirir sus aparatos eléctricos, al darles mantenimiento y respecto al uso que le dan a diario.

A los estudios enfocados desde el usuario se suman los realizados por otros autores [2, 4, 18, 19] que han estudiado el consumo eléctrico desde ambas perspectivas, e insisten en que el análisis del consumo de energía eléctrica se debe llevar a cabo con una visión integral de elementos técnicos y sociales, ya que ambas visiones se interrelacionan de forma que los cambios en una afectan a la otra; a través de estos estudios se ha encontrado que los consumos eléctricos del sector residencial se originan por aspectos técnicos y sociales influidos por el contexto físico y social.

En específico, algunos autores como Sáñez [6] mencionan en sus estudios que, en parte, las prácticas de consumo de energía eléctrica se relacionan con los estilos de vida de los usuarios, que pueden ser identificados a partir del esquema de prácticas cotidianas que ellos realicen en sus hogares en torno al uso de la energía eléctrica.

3. Consideraciones teóricas

De acuerdo con lo anterior, es posible observar el fenómeno del consumo de energía eléctrica a partir de los estilos de vida e incluso permitiría visualizarlo de manera amplia al abordar el comportamiento de los usuarios, en particular, existen enfoques teóricos como el de Pierre Bourdieu que permiten entender lo que es un estilo de vida, la forma en la que se constituyen, la participación de lo individual y lo social en ellos, la orientación de las elecciones materiales o simbólicas que se llevan a cabo y cómo devienen en modelos de consumo.

3.1 Los estilos de vida

Para definir entonces los estilos de vida en el presente trabajo, se aborda en primer lugar el concepto de *habitus*, el cual, junto con el concepto de campo y de capital forman la parte central del trabajo de Bourdieu. De acuerdo con lo expresado claramente por el autor, estas conceptualizaciones se definen de manera sistémica, porque "...están destinadas a ser puestas en obra empíricamente de manera sistemática" [20, p. 148] y, por lo tanto, sólo pueden ser definidos dentro de la estructura teórica que forman.

Por lo anterior, se presenta la definición de *habitus* expuesta por el autor como:

Sistema de disposiciones durables y transferibles – estructuras estructuradas predispuestas a funcionar como estructuras estructurantes – que integran todas las experiencias pasadas y funciona en cada momento como matriz estructurante de las percepciones, las apreciaciones y las acciones de los agentes cara a una coyuntura o acontecimiento y que él contribuye a producir [21, p. 54].

Por lo que se comprende que en el *habitus* se integran un conjunto de experiencias acumuladas

a lo largo de la vida, cuya base es establecida a través de un proceso histórico, donde, el *habitus* no sólo genera esquemas de percepción, apreciación y acción, sino que también se encarga de dotarlos de sentido para lo que Bourdieu denomina como agentes, y por medio del proceso histórico, se asegura de que estos esquemas se encuentren presentes y constantes en sus prácticas a lo largo del tiempo al otorgarle la capacidad de ser transferidas [22].

Para Bourdieu, el *habitus* es el principio generador y unificador de prácticas que permite que éstas sean reconocibles y previsibles de una manera inmediata (pero no determinista), y sean dadas por evidentes e incluso cualificadas como de sentido común, dependiendo del campo de que se trate, así, el *habitus* permite entender y descifrar prácticas y obras [23].

El *habitus* hace evidente la unidad entre prácticas y bienes materiales, es decir, entre signos distintivos propios a un agente o una clase de agentes, y es calificado como el principio de toda creación y como parte fundamental de "... todo lo que se tiene, personas y cosas, y de todo lo que se es para los otros, de aquello por lo que uno se clasifica y por lo que le clasifican" [21, p. 53] por lo que es posible entender que también convierte las diferencias entre prácticas en diferencias simbólicas asociadas a posiciones en el campo social.

Estas prácticas son conceptualizadas por el autor a partir de la fórmula "[(*habitus*) (capital) + campo = prácticas]" [21, p. 99] a partir de lo cual se entiende que las prácticas son generadas a partir del *habitus* como predisposición en relación con la acumulación y disponibilidad de capitales y conforme al campo en el cual se encuentran posicionados los agentes, las prácticas a su vez entonces, pueden relacionarse a un grupo social en particular.

Al referirse a los campos, el autor expone que, pensado de manera relacional, se puede definir como:

Una red o configuración de relaciones objetivas entre posiciones. Estas posiciones están objetivamente definidas, en su existencia y en las determinaciones que imponen sobre sus ocupantes, agentes o instituciones, por su situación presente y potencial (*situs*) en la estructura de distribución de especies del poder (o capital) cuya posesión ordena el acceso a ventajas específicas que están en juego en el campo, así como por su relación objetiva con otras posiciones (dominación, subordinación, homología, etcétera.) [20, p. 150].

La estructura que compone cada uno de los campos resulta dinámica debido al cambio en la distribución de capitales producto de las luchas entre los agentes que se encuentran en él, en este “juego” como lo denomina Bourdieu [23], los agentes buscan apropiarse de un volumen cada vez mayor de un capital específico, acorde al campo que se trate, que les permitan existir y ubicarse en una posición determinada en el campo correspondiente, y a su vez, estar en disposición de dominarlo, es por estos constantes cambios en su estructura que la delimitación de un campo es complicada y puede ser solamente determinada por una investigación empírica que permita analizar hasta dónde se pueden encontrar los efectos del campo sobre los agentes [21].

De acuerdo con Bourdieu y Wacquant [20] existen cuatro tipos de capital primarios los cuales se dividen en: capital económico, capital social, capital cultural y capital simbólico, los capitales pueden ser conceptualizados como “instrumento de apropiación de las probabilidades teóricamente ofrecidas a todos” [22, p.103]. Cada capital integra un tipo de recurso en especial, por ejemplo, recursos económicos como el dinero, recursos

culturales como diplomas o títulos universitarios o recursos sociales como relaciones sociales y recursos simbólicos propios de los agentes como el prestigio o el gusto, etc. [24].

El valor de cada uno de estos capitales es determinado por el campo mismo, conforme los cambios que se generan por las luchas al interior de él, se generan variaciones que ocasionan cambios de valor en los capitales de un mismo campo a lo largo del tiempo y entre campos distintos, por ende, se hace evidente la relación entre capital y campo, la lógica que subyace la acumulación de capital es permitirles a los agentes introducir un cambio en la dinámica del campo a través de esta lucha, con la finalidad de adquirir poder sobre el campo y sus reglas [20].

En resumen, la relación sistemática entre *habitus*, campo, y capital, como productores de las prácticas constituye una forma de concebir y explicar partes del mundo social y/o campo en donde esta estructura teórica sea aplicada.

No solamente las prácticas forman parte de los estilos de vida, el autor expone que, en su origen, el gusto participa activamente, ya que el *habitus* genera y clasifica los signos distintivos a través de él, lo que lleva a Bourdieu a calificarlo como el “operador práctico de la transmutación de las cosas en signos distintos y distintivos...” [21, p. 174], desde esta perspectiva, el gusto es el discernimiento entre la parte intelectual y la parte sensitiva que en conciliación logran definir a los agentes [21]. Por tal razón es posible encontrar a partir del gusto características posibles de ser asociadas a cada agente y que éste suministra a manera de información, ya sea de forma consciente o inconsciente.

El gusto como “propensión y aptitud para la apropiación (material y/o simbólica) de una clase determinada de objetos o de prácticas enclasadadas y enclasantes, es la fórmula generadora que se encuentra en la base del estilo de vida” [21, pp. 172 – 173], a través del gusto es posible expresar en cada uno de los bienes materiales (mobiliario, casa, etc.) y prácticas (forma de hablar, caminar, etc.) una misma intención. A partir de lo anterior se entiende que el gusto lleva la elección de objetos materiales (físicos) y prácticas de los agentes hacia el espacio de signos distintivos e identificables, es decir, diferencias simbólicas asociadas a una posición en el campo social, siempre y cuando puedan ser percibidas y apreciadas al entrar en el orden simbólico de la posición de clase [21]. El gusto se encuentra en el fundamento de los estilos de vida porque traduce las elecciones realizadas de manera cotidiana en signos distintos y distintivos lo cual es posible entender a partir del *habitus* [21].

De acuerdo con Bourdieu, los estilos de vida son “productos sistemáticos de los *habitus* que, percibidos en sus mutuas relaciones según los esquemas del *habitus*, devienen en sistemas de signos socialmente calificados como (“distinguidos”, “vulgares”, etc.)” [21, pp. 171 – 172], debido a esta particularidad, los estilos de vida se encuentran también condicionados por la capacidad de ser objetivamente clasificables y por la posición en el campo social de tales condiciones de existencia, por lo que los estilos de vida existen en tanto puedan ser percibidos y apreciados por cualquier agente que posea los esquemas necesarios para identificarlos, interpretarlos y evaluarlos [21].

Los estilos de vida, tal como se describen anteriormente, existen en el conjunto de propiedades objetivas (bienes materiales, como muebles, casa, cuadros, libros, etc.) y en las prácticas en que manifiesta su distinción (por ejemplo, actividades deportivas y culturales) que rodean a los agentes por acción del *habitus* como

principio unificador y generador de todas las prácticas. Por lo anterior es posible comentar que dentro de un estilo de vida será posible encontrar prácticas y bienes materiales que traducidos a signos distintivos por acción del gusto podrán ser identificados y diferenciados por los agentes que posean los esquemas necesarios según su posición en un campo social [21].

De acuerdo con Bourdieu [21], los estilos de vida como sistema de prácticas generadas por el *habitus* constituyen estructuras sociales y también modelos de consumo, es decir, el consumo a partir de los estilos de vida en tanto prácticas, es una manera de diferenciación. Por lo anterior, es posible considerar que los estilos de vida en tanto esquemas de prácticas identificables a partir del gusto, constituyen modelos de consumo distintivos que permiten entre otras cosas, entender las variaciones en el consumo de energía eléctrica.

3.2 Los estilos de vida, el consumo de energía eléctrica y prácticas proambientales.

Los estudios que relacionan los estilos de vida con el consumo de energía eléctrica forman parte de una de las diversas perspectivas que hace uso del concepto con el fin de explicar algunos fenómenos, en donde es posible encontrar numerosos estudios [25, 26, 27, 28] que relacionan los estilos de vida con el campo de la medicina con el fin de explicar fenómenos que permitan favorecer la salud de los individuos. En el campo de la psicología [29, 30] se ha utilizado con el fin de estudiar el comportamiento de los individuos en razón de toma de decisiones e identificación social. En estudios sociológicos se retoma la relación individuo - contexto sociocultural. Mientras que en el desarrollo sustentable se destacan por ser estudios recientes que expresan que los estilos de vida influyen sobre las prácticas que

realizan los individuos y que se relacionan con alguna o varias de dimensiones del desarrollo sustentable, en particular hay estudios que mencionan las conductas proambientales.

Un ejemplo de lo anterior es el presentado por Weber, C., *et.al.* [31] en donde se realizó un comparativo entre dos grupos con el objetivo de observar el grado de diferenciación entre sus prácticas en relación con el cuidado del medio ambiente, para ello, se caracterizó un estilo de vida considerado proambiental a partir de las prácticas de los usuarios relacionadas con la motivación ecológica y hábitos de consumo considerados como amigables con el medio ambiente, por lo que fue posible identificar la influencia de los estilos de vida en la configuración de prácticas relacionadas a la perspectiva ambiental del desarrollo sustentable.

Corral, V., *et.al.* [32] propuso comprobar a través de un modelo estructural de determinantes psicológicos que en un estilo de vida se integran prácticas sociales como el altruismo, la frugalidad y la conducta proambiental, por este medio, se estableció que, una vez consolidado el estilo de vida, influye sobre las prácticas dando lugar a consumos austeros, acciones de cuidado ambiental como conductas pro ecológicas y comportamientos altruistas en torno al cuidado del contexto social. Corral [33] explica que una conducta proecológica, también llamada conducta proambiental o comportamiento proambiental, se constituye de “el conjunto de acciones deliberadas y efectivas que responden a requerimientos sociales e individuales y que resultan en la protección del medio” [33, p.28]. A través de esta definición es posible entender que el conjunto de acciones a las que hace referencia el autor es a lo que se le puede denominar como prácticas proambientales.

Las prácticas proambientales por lo tanto pueden considerarse como deliberadas, efectivas, tanto

individuales como sociales, y que tiene como finalidad la protección del medio ambiente. A partir de los planteamientos de Corral [33] es posible comentar también que, al verlas en conjunto expresadas por medio del comportamiento proambiental, generan cambios visibles en el medio, buscan la solución de un problema o requerimiento de protección del medio individual o social, y en algún momento se llevan a cabo con la finalidad de anticipar o planear un resultado.

De acuerdo a los autores [32], se observa que las personas que se interesan por la conservación del medio físico también procuran el cuidado del entorno social. Por ello, es observable la influencia del estilo de vida sobre algunas prácticas relacionadas tanto a la dimensión ambiental como a la dimensión social del desarrollo sustentable.

En otro estudio [34], se analizó cómo y porqué los consumidores podrían transitar hacia el uso de tecnologías pro ambientales. Desde la teoría de los estilos de vida, se realizó un análisis cuantitativo de actitudes y aceptación de ideas nuevas y se encontró que el compromiso hacia las prácticas pro ambientales forma un estilo de vida independiente, lo que influye en el interés de las personas en elegir o no una tecnología pro ambiental.

En los estudios que abordan los estilos de vida desde esta perspectiva es posible identificar su relación con algunas prácticas y los efectos ambientales, sociales y económicos que producen, tal es el caso de las prácticas de consumo de la energía eléctrica, fenómeno que ha sido estudiado por autores como Palmborg [35] quien realizó en hogares Suecos un análisis comparativo de los hábitos guiados por valor relacionados a la energía, por medio del cual se concluye que los hábitos de uso de la energía en los hogares son expresiones de los estilos de

vida que se constituyen a partir del uso de la electricidad como un significado de ciertas metas, conveniencia e higiene.

Por otra parte, es posible encontrar un estudio [36] donde se abordan los estilos de vida como un parteaguas que marcan la tendencia en el uso de la energía por la influencia que tiene sobre el manejo y la propiedad de aparatos domésticos en los hogares, en este sentido, el estudio de Lutzenhiser y Hill [37] demuestra la importancia de la estratificación social de los estilos de vida y el status, por este medio se encontró que resulta necesario preguntar acerca de las lógicas internas y significado del consumo de energía dependiendo del grupo que se trate.

También, el estudio exploratorio desarrollado por el Servicio Nacional del Consumidor [38], retoma a los estilos de vida como una forma de diferenciación de grupos familiares Chilenos, y se encontró que el estilo de vida del grupo familiar es uno de los principales factores que determinan los patrones de consumo eléctrico, asimismo se identificó que las familias generan un patrón de consumo eléctrico familiar a partir de quienes permanecen más tiempo en el hogar y quienes tienen roles de mayor poder al interior del grupo familiar, tal patrón familiar puede variar con respecto al de los integrantes de la familia.

En el trabajo de Fong, Matsumoto, Lun y Kimura [39], se estudian los impactos del estilo de vida sobre el consumo de energía en hogares ubicados en tres zonas climáticas de Japón, con el objetivo de realizar proyecciones futuras del consumo de energía eléctrica, a partir de ello se señalan dos aspectos importantes, el primero expone que la constante en el potencial ahorro energético es a través del uso de accesorios en el hogar, lo que dificulta la cooperación de todos los hogares en la tarea del uso racional de la energía eléctrica y el segundo señala que los cambios sociales indirectamente tienen como resultado el

incremento de los consumo de energía en los hogares.

A partir de los trabajos anteriores, se destaca la importancia de la relación entre los estilos de vida, el consumo de la energía eléctrica y las conductas proecológicas que se identifican en los hogares donde se realizaron los estudios mencionados.

3.3 El consumo de energía eléctrica en Mexicali

Los niveles de consumo de energía eléctrica del sector residencial, de los estados de la frontera norte de México y sobre todo de los que se encuentran en zonas áridas son muy elevados, de acuerdo con datos de CFE a octubre de 2011, Baja California ocupa el lugar número diez de consumo de energía eléctrica a nivel nacional, los usuarios de electricidad de estas zonas tienen consumos per cápita por encima de cualquier otro usuario del país, a razón de que un usuario que habita en esta zona consume tanta energía en un mes de verano como el resto de usuarios consume en un año [6]. Es por esto que destaca la necesidad de atender los altos niveles de consumo de electricidad en estas zonas, sin embargo, es notable que las características ambientales de estas regiones generan en sus habitantes prácticas específicas producto de distintos factores, sobre todo provenientes de la necesidad de adaptación con el medioambiente [4].

La ciudad de Mexicali se sitúa geográficamente en la zona mencionada, la cual además se encuentra catalogada como de nivel de ingreso alto a diferencia del resto de México, por lo que la ciudad presenta una estructura de consumo de energía singular y en ocasiones compleja producto de su crecimiento poblacional (a razón de 9.44% en el periodo de 2005 a 2010); la expansión de las actividades económicas

(mayormente de índole industrial) que se llevan a cabo en la ciudad; un “componente estacional” [6, p. 54] atribuido al contexto climático desfavorable producto de las altas temperaturas en los meses de verano (41.8 °C promedio de máximas en julio y 40.9 °C en agosto) [4]; a la facilidad de adquisición de equipo eléctrico nuevo y usado el cual trabaja con una menor eficiencia; y finalmente a que las tarifas eléctricas establecidas no consideran las temperaturas presentes en la ciudad en los meses de verano [4, 5].

Con base en lo anterior, es posible decir que existe en la ciudad un gran impacto económico, social y ambiental producto de la forma en que se consume la energía eléctrica, por ejemplo, los usuarios residenciales (85% del total de usuarios en el municipio) emplean hasta un 40% de su ingreso familiar en realizar el pago del servicio de energía eléctrica [6].

Con la finalidad de disminuir los impactos del alto consumo de energía eléctrica en la ciudad, se han elaborado algunas investigaciones que abordan el problema desde una, otra o ambas perspectivas antes mencionadas (técnica y social), entre ellas se encuentran investigaciones realizadas por la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), que se relacionan con la adecuación ambiental de las viviendas de interés social y popular y también se pueden identificar investigaciones como “Impacto del consumo eléctrico sobre la economía familiar en Mexicali B.C.” realizadas en conjunto por CFE, UABC y Gobierno del Estado de Baja California, entre otras, que han permitido identificar que la forma en la que se dan los consumos de energía eléctrica en la ciudad se debe en parte a equipos de aire acondicionado poco eficientes que funcionan bajo temperaturas demasiado altas para su diseño; a que gran parte de las viviendas tienen un sistema constructivo poco adecuado para la zona climática; al uso excesivo de equipos electrodomésticos; a la

manera en la que los usuarios hacen uso del servicio eléctrico; a que los programas diseñados para disminuir consumos eléctricos se dirigen en promedio al 32.5% de los usuarios residenciales y a las variaciones en el consumo producto del nivel de ingreso de los usuario [6].

Se observa entonces que la perspectiva técnica ha sido la más abordada en los estudios para la ciudad de Mexicali, mientras que la perspectiva social ha sido abordada en menor número, sin embargo, a partir de los estudios analizados previamente es posible identificar la necesidad de llevar a cabo un estudio con el fin de proponer la inclusión de estos aspectos en los programas de eficiencia energética con el fin de orientarlos hacia la sustentabilidad ambiental, que reconozca los estilos de vida energéticos de los hogares de la ciudad de Mexicali, B.C., para lo cual se lleva a cabo la categorización de los estilos de vida energéticos de los hogares a partir de sus prácticas proambientales y de consumo de energía eléctrica.

4. Método de la investigación.

El presente trabajo es de corte cuantitativo, descriptivo y transversal, toma como base metodológica los trabajos de Romero [4] y Sandez [6] debido a la representatividad y pertinencia con la que abordan el tema del consumo de energía eléctrica en el sector residencial de la ciudad de Mexicali y en cuyo contenido es posible encontrar aspectos metodológicos que pueden ser adaptados al presente estudio cuyo propósito es el de caracterizar los estilos de vida de los hogares de la ciudad de Mexicali, B.C. a partir de sus prácticas proambientales y de consumo de energía eléctrica, por lo que se indaga acerca del conjunto de prácticas de ahorro de energía eléctrica, agua, reciclaje de residuos, compra de productos amigables con el medio ambiente, participación en programas relacionados al

cuidado del medio ambiente y tipo de movilidad a puntos cercanos.

La población a estudiar se encuentra constituida por 197,058 hogares pertenecientes a la zona urbana de Mexicali de acuerdo con datos obtenidos del laboratorio de geomática del Instituto de Investigaciones Sociales de la UABC, de los cuales, se tomó como informante a la persona mayor de 18 años que estuviera la mayor cantidad de tiempo en el hogar o asumiera la jefatura del mismo -sin considerar si constituye o no el principal ingreso del hogar- con el propósito de aplicar el instrumento elaborado para obtener la información pertinente, ya que de acuerdo con el SENARC [37] estos integrantes son quienes determinan el patrón común de consumo de energía eléctrica en los hogares, aunque no se descarta que pueden existir diferencias en las conductas de los integrantes del hogar.

Como unidad de muestreo se seleccionaron los hogares de la zona urbana de Mexicali, que fueron elegidos a través de un muestreo aleatorio, estratificado por valor catastral de los predios, ya que, de acuerdo con la teoría abordada, y los estudios analizados, el valor catastral de los predios es una forma de distinción de las prácticas de consumo energético. La información del valor catastral se obtuvo del periódico oficial del estado de Baja California el cual contempla un total de cinco estratos, este diseño de muestreo fue seleccionado principalmente debido a la representatividad de la muestra.

El cálculo del tamaño de la muestra, se trabajó con un error máximo del 5% ($E= 0.05$) y con un nivel de confianza de 90% ($z = 1.645$) lo que arrojó como resultado un total de 273 cuestionarios a aplicar a partir de la población total de hogares (197,058), las cuales fueron afijadas proporcionalmente al tamaño del estrato y posteriormente seleccionadas y ubicadas a través de un generador de números aleatorios utilizando

como marco el listado y el mapa de manzanas urbanas de la ciudad de Mexicali, a partir de lo anterior la muestra final se distribuye como se muestra a continuación:

Tabla 1. Distribución de muestra por estrato

Estrato	Población (hogares por estrato)	Muestra (encuestas por estrato)
1	14,370	20
2	23,789	33
3	99,271	137
4	38,216	53
5	21,412	30

Donde; el estrato 1 corresponde a los hogares con un nivel de ingreso alto y que se ubican en las zonas de la ciudad con mayor plusvalía y en la mayoría de los casos se desarrollan en residenciales privados; el estrato 2 corresponde a hogares con un nivel de ingreso medio alto ubicados en zonas de plusvalía alta que no siempre se ubican dentro de residenciales privados; el estrato 3 integra los hogares que poseen un nivel de ingreso medio, es donde se concentra el mayor número de la población y se reparte uniformemente en la zona urbana de la ciudad de Mexicali; en el estrato 4 se encuentran los hogares que tienen un nivel de ingreso medio bajo y que se ubican en zonas de plusvalía baja; el estrato 5 se compone de hogares con un nivel de ingreso bajo y que se ubican regularmente en las periferias de la ciudad en zonas de baja plusvalía.

La información fue recolectada a través de una encuesta aplicada a la totalidad de la muestra. El instrumento seleccionado para tal fin fue un cuestionario adaptado de los elaborados anteriormente por Romero [4] y Sandez [6],

cabe señalar que el uso del cuestionario fue debido a la flexibilidad que ofrece conforme a las características del trabajo, así como al tiempo disponible para su realización. Integra preguntas abiertas, una batería de preguntas en formato tabular, preguntas dicotómicas, pluricotómicas con opción múltiple y preguntas de opinión.

El cuestionario fue dividido en 5 secciones [figura 1], la primera parte permitió recuperar información acerca del hogar y la persona entrevistada, por ejemplo, años viviendo en Mexicali, su último grado de estudios, su ocupación, el tiempo de permanencia en el hogar y el tiempo que dedica a dormir, la segunda parte permitió caracterizar los hogares en función de la clasificación de hogares de INEGI, la cual se basa en el parentesco de los habitantes del hogar, la tercera parte del cuestionario ayudó a contextualizar las prácticas de ahorro de energía eléctrica como parte del conjunto de prácticas amigables con el medio ambiente lo cual busca determinar parte de la constitución de los estilos de vida a partir del interés en el cuidado del medio ambiente, el reciclaje, la movilidad a puntos cercanos y el cuidado del agua.

La cuarta parte del cuestionario permitió caracterizar el ahorro de energía eléctrica a partir de la percepción del consumo energético, acciones de ahorro de energía eléctrica, uso de aparato de aire acondicionado en el hogar, uso de calefacción en el hogar, interés en el ahorro de energía, relevancia de aparatos eléctricos, pago por consumo de energía eléctrica, y la parte final del cuestionario recoge a través de una bitácora de observación características visibles del hogar como su orientación, el material predominante en techo y el material predominante en muros.

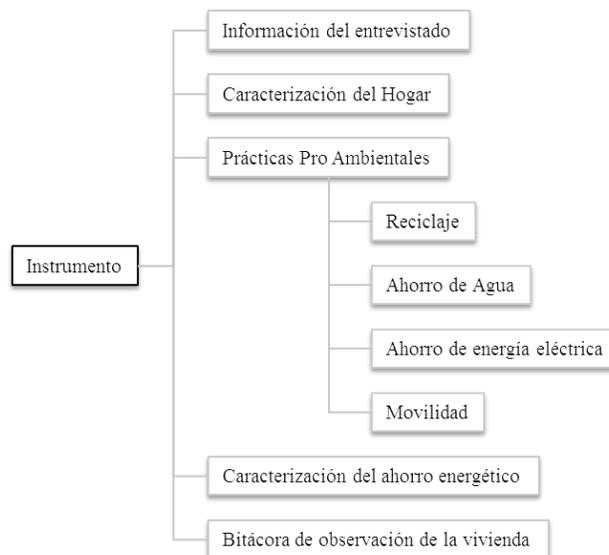


Figura 1. Estructura del instrumento para recolección de la información)

Para el análisis de datos se utilizó el programa estadístico SPSS versión 21, por medio del cual se realizó un análisis de clúster o conglomerados jerárquico, para el cual, primero se llevó a cabo un análisis de exploración y uno descriptivo con la finalidad de identificar la presencia de casos atípicos en las variables a utilizar para la formación de los conglomerados, una vez identificados se eliminaron casos atípicos y asimetrías aplicando el recalcado de variables a partir de la escalera de Tukey. Posteriormente se hizo el análisis de correlación haciendo uso del coeficiente de Pearson de dos colas y se prosiguió a realizar el análisis de conglomerados jerárquicos mediante el método de Ward, el cual se acompaña de la distancia euclídea al cuadrado como medida de distancia entre conglomerados.

De lo anterior se obtienen diversos productos, el primero es la matriz de distancias a partir de la distancia euclídea al cuadrado, también se obtuvo el historial de aglomeración. Asimismo, se obtuvo la tabla de pertenencia de conglomerados la cual se realizó para 2, 3, 4 y

5 casos y como producto final se obtuvo el dendograma que muestra gráficamente el historial de formación de conglomerados.

Para definir el número óptimo de conglomerados se realizó el corte del dendograma a partir del análisis entre la distancia existente entre conglomerados y el número de pasos de aglomeración, a partir de la cual se define que el número óptimo de conglomerados es de tres.

Ya definido el número de conglomerados se procedió a realizar la comparativa de las medias de ellos tomando como variable independiente aquella arrojada posterior al análisis de clúster, y como variables dependientes todas aquellas variables que se utilizaron en el levantamiento de información, proceso que arroja los siguientes resultados que permite identificar las características de cada uno de los conglomerados.

5. Resultados y discusiones

5.1 Estilo de vida 1

A partir del análisis de la información obtenida de la encuesta aplicada a la totalidad de la muestra mencionada con anterioridad, se obtuvieron promedios para la ciudad que serán utilizados progresivamente para comparar y apoyar en la descripción de los tres conglomerados o estilos de vida encontrados, de los cuales el primero es llamado "Ahorran, pero se dan sus lujos", también caracterizados como los no proambientales, este estilo de vida se encuentra formado por 65 hogares que representan el 23.8% de los hogares de la muestra, se clasifican como hogares nucleares de acuerdo a INEGI, y se encuentran formados en su mayoría por 4 integrantes. Además, son hogares que pertenecen a un nivel socioeconómico medio y medio alto principalmente.

De acuerdo con la información obtenida en el levantamiento, los hogares pertenecientes a este

conglomerado muestran una preocupación especial por la contaminación del aire de la ciudad, son hogares en los que se realizan en promedio tres prácticas amigables con el medio ambiente, es decir, una práctica por debajo del promedio de la ciudad, la más mencionada es el ahorro de energía eléctrica que se lleva a cabo en un 85% de los hogares, en segundo lugar se ubican las prácticas relacionadas con el ahorro de agua que se realizan en 77% de los hogares, y en tercer lugar se menciona en un 63% de los hogares el uso consciente del automóvil como medio de desplazamiento para distancias cortas, cabe señalar que los porcentajes aparecen por debajo del 93, 90 y 81% registrados en la ciudad, y respecto a los otros conglomerados se ubica en segundo lugar en ahorro de energía eléctrica, y en tercer lugar en ahorro de agua y en el uso consciente del automóvil.

Además, es posible señalar que, a comparación de los promedios registrados en la ciudad y los hogares de los otros conglomerados, estos hogares tienen una baja participación en actividades comunitarias para el cuidado del medio ambiente, actividades de reciclaje y compra de productos amigables con el medio ambiente, por lo que es posible comentar que estos hogares, registran una baja actitud proambiental.

En el tema de las formas de uso de la energía eléctrica, los hogares de este conglomerado consideran que su consumo de energía eléctrica es de un nivel medio por lo que no representa una inversión significativa con respecto de su ingreso, se llevan a cabo 11 prácticas de ahorro de energía eléctrica en promedio, lo que es equivalente al promedio registrado para la ciudad, no obstante, el 55% de los hogares de este conglomerado sobrepasan el promedio.

Las prácticas de ahorro de energía eléctrica que mayor participación registran son: vigilar las

puertas y ventanas cuando el aparato de aire acondicionado se encuentra encendido, en el 98% de los hogares; y dar mantenimiento una vez al año al aparato de aire acondicionado, en el 95% de los hogares, por lo que, para estos hogares, las prácticas más importantes de ahorro de energía giran en torno al aparato de aire acondicionado.

En segundo lugar de participación, se registran prácticas de ahorro de energía relacionadas con actividades cotidianas de los integrantes de los hogares, entre ellas están: apagar las luces cuando no se necesitan, llevada a cabo en un 92% de los hogares; y apagar los aparatos eléctricos cuando no se están utilizando, realizada en un 83% de los hogares.

En tercer lugar, aparecen las prácticas relacionadas con el uso racional de aparatos y electrodomésticos que consumen gran cantidad de energía eléctrica como la lavadora, el microondas y la plancha, en promedio, 73% de los hogares muestran un uso racional.

En cuarto lugar, se registra la adquisición de aparatos eléctricos de alta eficiencia, o de energía alterna, tales como paneles, o calentadores solares, porque a pesar de que el 82% de los hogares cuentan con focos ahorradores, apenas el 7% de los hogares cuentan con alguno de los otros anteriormente mencionados.

Con base en lo anterior, se puede decir que, aunque los hogares de este conglomerado se ubican en el promedio de prácticas de ahorro de energía llevadas a cabo en la ciudad junto con los hogares del tercer conglomerado, el grueso de los hogares que realizan más prácticas de ahorro que el promedio de la ciudad es menor a los del tercer conglomerado, por lo que en este caso los hogares se ubican en segundo lugar, además es posible observar la importancia del aire acondicionado en

las actividades que realizan en búsqueda del ahorro.

Con referencia a los aparatos de aire acondicionado que existen en los hogares, se puede mencionar que es posible integrar a las prácticas de ahorro de energía el uso de aparatos eficientes, un ejemplo de ello es el uso de aparatos de refrigeración de tipo “mini Split” como principal medio de acondicionamiento ambiental, es posible observar que el 40% de los hogares cuentan con “mini Split”, mientras que el 31% de los hogares cuentan con aparatos de refrigeración de ventana, y en ninguno de los hogares se cuenta con *cooler*¹.

Respecto al uso de los equipos de climatización artificial, 45% de los hogares operan el aire acondicionado con una temperatura por debajo de 25°C, 40% de los hogares operan sus aires acondicionados aproximadamente a 25°C y un 15% de los hogares operan el aire acondicionado con una temperatura por encima de 25°C. Además, los aparatos de aire acondicionado se mantienen en operación en promedio 17 horas al día lo cual se encuentra por encima de las 16 horas promedio que se registra en la ciudad y en comparación con los hogares de los otros conglomerados, estos hogares son los que mantienen en operación el aire acondicionado por más tiempo.

A partir de lo anterior, se reflexiona que los hogares cuentan mayormente con un equipo de aire acondicionado y una temperatura de operación que favorece el ahorro de energía, a excepción del tiempo de operación del aire acondicionado.

En el aspecto relacionado con el interés por el ahorro de energía, los hogares de este conglomerado llevan a cabo 2 prácticas en

¹ Conocido como enfriador evaporativo convencional, disminuye la temperatura del aire que atraviesa por una

corriente de agua, lo que permite absorber energía durante la evaporación del agua.

promedio, lo que es equivalente al promedio de la ciudad y al promedio de los demás conglomerados. Cuando los hogares de este conglomerado se informan sobre maneras de ahorrar energía eléctrica lo hacen principalmente a través de la televisión, el 23% de los hogares conocen - a través de su recibo de luz - su consumo de energía eléctrica y en comparación con los demás conglomerados, son los hogares más informados.

Respecto a la participación en algún programa de ahorro energético, el 17% de los hogares han utilizado alguno de ellos, lo que coloca a estos hogares en un nivel medio de participación respecto a los otros conglomerados, en tanto que el programa de ahorro de energía más conocido es el ASI.

Por las razones anteriores que se puede decir que, aunque los hogares de este conglomerado se informan acerca de maneras para ahorrar energía eléctrica y conocen los programas que promueven el ahorro energético, los utilizan poco o no los ponen en práctica.

Las características de los hogares respecto de las formas de consumo de energía eléctrica mencionadas con anterioridad se expresan a través de la factura por uso del servicio eléctrico, la cual expresa que en verano se paga en promedio \$2527 pesos y en invierno \$971 pesos, en una escala per cápita, en verano el pago es de \$709.14 pesos y en invierno el pago es de \$277.66 pesos, cabe señalar que los pagos mencionados en este conglomerado y en los subsecuentes se asocian también al volumen de los espacios climatizados.

5.2 *Estilo de vida 2*

El segundo conglomerado se denomina “Poco interesados, pero ahorran”, este conglomerado se encuentra formado por 90 hogares los cuales representan el 33% de los hogares de la muestra total, son hogares que se consideran de un nivel

socioeconómico medio y medio bajo principalmente, al igual que el primer conglomerado, se clasifican principalmente como hogares nucleares, y se encuentran formados por sólo 3 integrantes, lo que los coloca como el conglomerado con el menor número de integrantes por hogar.

La contaminación del aire de la ciudad es el principal problema ambiental que se reconoce en estos hogares, sin embargo, también se mencionan otros problemas como la presencia de basura en lotes baldíos y la quema de basura. Al igual que en el primer conglomerado, en estos hogares realizan en promedio tres prácticas amigables con el medio ambiente, es decir, una práctica menos que el promedio registrado en la ciudad.

Las prácticas que se realizan comúnmente son distintas a las de los hogares del primer conglomerado, en este caso, se mencionan principalmente: el ahorro de agua, realizada en el 91% de los hogares; el uso consciente del automóvil como medio de desplazamiento para distancias cortas en el 82% de los hogares; y el ahorro de energía eléctrica en el 64% de los hogares. Cabe señalar dos aspectos: el primero es que de acuerdo con los porcentajes de participación en torno a las prácticas amigables con el medio ambiente mencionadas anteriormente y otras como el reciclaje y la compra de productos amigables con el medio ambiente, los hogares de este conglomerado se ubican en segundo lugar de participación; el segundo es que el porcentaje de participación de los hogares en actividades de ahorro de energía se encuentra muy por debajo del promedio registrado en la ciudad, así como los porcentajes de los hogares de los otros conglomerados, por lo que es posible exponer que los hogares de este conglomerado tienen una mediana actitud proambiental.

Los hogares de este conglomerado tienen un pago por consumo de energía eléctrica bajo, no obstante, muestran poco interés en el ahorro energético y llevan a cabo pocas prácticas de ahorro de energía, los resultados muestran que en los hogares se llevan a cabo en promedio diez prácticas que buscan el ahorro de energía eléctrica, lo que significa que este es el conglomerado en donde los hogares realizan menos prácticas de ahorro de energía eléctrica. El promedio de prácticas realizadas, ubica a estos hogares debajo del promedio de la ciudad y en último lugar a comparación de los otros conglomerados.

La práctica más común es apagar las luces cuando no se necesitan, mencionada en un 98% de los hogares, le siguen, mantener cerradas puertas y ventanas cuando el aire acondicionado se encuentra en operación y darle un mantenimiento anual mencionadas en el 92% de los hogares, y la limpieza frecuente de los filtros de los aparatos de aire acondicionado en el 88% de los hogares, lo cual muestra la atención especial que el aire acondicionado recibe.

También tienen gran mención otras prácticas como: apagar los aparatos que no se encuentran en uso en el 91% de los hogares; abrir poco el refrigerador y guardar los alimentos fríos en el 84 y 82% de los hogares. Y finalmente, a excepción de los focos ahorradores utilizados en el 81% de los hogares, las prácticas que tienen relación con la posesión de otros aparatos eficientes, paneles, luminarias o calentadores solares, son las menos mencionadas con un rango máximo del 2%.

A partir de lo anterior es posible observar la atención hacia las prácticas relacionadas con el uso del aire acondicionado, pero también es posible observar el incremento en la importancia de las prácticas relacionadas con otros aparatos como el refrigerador, no obstante, los porcentajes de participación de las distintas prácticas de ahorro muestran que en este conglomerado se encuentran

los hogares que menos realizan actividades de ahorro de energía eléctrica.

En el tema del aire acondicionado, 57% de los hogares cuenta con aire acondicionado de ventana, y 20% de los hogares cuentan con mini Split, situación inversa a la encontrada en el primer conglomerado. La forma en la que se utiliza el aire acondicionado muestra que 44% de los hogares lo operan con una temperatura por debajo de los 25°C, 37% de los hogares mantienen una temperatura de operación en 25°C y 19% de los hogares operan su aire acondicionado con una temperatura por encima de los 25°C. En relación con el tiempo de operación, el promedio es de 15 horas al día, por lo que son los hogares que menos tiempo utilizan el aparato de aire acondicionado.

En el tema del interés por el ahorro de energía eléctrica, los hogares de este conglomerado comparten características de los hogares del primer conglomerado en la cantidad de prácticas que llevan a cabo, en el principal medio por el cual se informan acerca de modos de ahorrar energía, en el principal medio por el cual se enteran acerca de su consumo, y en la cantidad y nombre principal del programa de ahorro de energía que conocen, sin embargo, existe un mayor desconocimiento de su consumo energético, porque el 82% de los hogares dicen desconocerlo, y del mismo modo, solamente el 12% de los hogares reportan haber utilizado alguno de los programas que promueven el ahorro energético.

Tales resultados permiten exponer que, a pesar de tener una mediana actitud proecológica, al realizar la comparación con los hogares de los otros conglomerados, estos son los que menos acciones e interés muestran hacia el ahorro de energía eléctrica, tal y como lo mostraba el porcentaje de hogares que reportaban realizar actividades de ahorro de energía, no obstante,

muestran un mejor manejo en torno a la temperatura y tiempo de operación de los aparatos de aire acondicionado.

Debido a las formas de consumo de energía eléctrica de estos hogares, se registra que en verano se paga en promedio \$776.22 pesos y en invierno \$323.82 pesos, siendo los valores per cápita de \$295.88 pesos en verano y \$122.39 pesos en invierno.

5.3 Estilo de vida 3

El tercer conglomerado es llamado "Proecológicos" y se compone de 118 hogares que representan el 43.2% de la muestra, son hogares de tipo nuclear que cuentan con 4 integrantes que se clasifican principalmente dentro de un nivel socioeconómico medio y medio bajo.

En estos hogares se existe preocupación por los problemas relacionados con la contaminación del aire de la ciudad, pero, a diferencia de los conglomerados anteriores, se llevan a cabo cinco prácticas amigables con el medio ambiente en promedio, por lo que se ubica como el conglomerado que muestra la mayor participación en este aspecto, aún por encima del promedio registrado en la ciudad.

Entre las prácticas amigables con el medio ambiente que más se realizan, se encuentran, el ahorro de energía eléctrica en 99% de los hogares, el ahorro de agua en el 97% de los hogares y las actividades de reciclaje en el 94% de los hogares, además, es posible encontrar en este conglomerado los hogares con los porcentajes más altos de participación en cualquiera de las otras prácticas amigables con el medio ambiente, como, participación comunitaria en actividades en proambientales, compra de productos amigables con el medio ambiente y uso consciente del automóvil en distancias cortas, incluso, los hogares de este conglomerado cuentan con

porcentajes por encima de los promedios registrados en la ciudad, como resultado, es posible mencionar que los hogares pertenecientes a este conglomerado tienen una elevada actitud proambiental.

La forma en la que se utiliza la energía eléctrica en los hogares, indica que se llevan a cabo once prácticas de ahorro de energía en promedio, que equivale a los promedios de la ciudad y del primer conglomerado, no obstante, el 61% de los hogares de este conglomerado sobrepasan estos promedios, lo que se traduce en que en este conglomerado se encuentran los hogares que llevan a cabo más prácticas de ahorro de energía.

Tres de las principales prácticas de ahorro de energía que se llevan a cabo en los hogares tienen relación con el uso del aparato de refrigeración, las cuales son: cerrar puertas y ventanas cuando el aparato de aire acondicionado se encuentra encendido, mencionada en el 100% de los hogares; dar mantenimiento anual al aparato de aire acondicionado mencionada en un 97% de los hogares; y dar limpieza a los filtros del aparato de aire acondicionado de manera frecuente, mencionada en un 93% de los hogares.

Otras prácticas que se mencionan frecuentemente son: apagar las luces cuando no se requieren, mencionada en un 97% de los hogares; apagar los aparatos eléctricos cuando no están en uso, mencionada en un 92% de los hogares; y otras relacionadas con el uso racional de aparatos eléctricos que consumen una gran cantidad de energía en el hogar como la plancha, la lavadora y el microondas.

Las prácticas que se mencionan con menos frecuencia en los hogares de este conglomerado, son aquellas que se relacionan con el uso y propiedad de aparatos eficientes,

paneles, luminarias o calentadores solares, a excepción de los focos ahorradores que son utilizados en el 85% de los hogares, sin embargo, cabe mencionar que el porcentaje del uso de paneles solares es el más alto respecto de los conglomerados anteriores y del porcentaje registrado en la ciudad.

Con base en lo anterior se observa que el comportamiento en los hogares respecto de las formas de uso de energía eléctrica es muy similar a los conglomerados anteriores, sin embargo, para este caso, existe una mayor participación en prácticas de ahorro de energía lo que convierte a los hogares de este conglomerado en los más interesados en este sentido.

Respecto a los aparatos de aire acondicionado, 46% de los hogares cuenta con aire acondicionado de tipo mini Split, y 40% de los hogares cuentan con refrigeración de ventana. La forma en la que se utiliza el aire acondicionado muestra que 43% de los hogares lo operan con una temperatura por debajo de los 25°C recomendados, 38% de los hogares mantienen una temperatura de operación en 25°C 19% de los hogares operan su aire acondicionado con una temperatura por encima de los 25°C. En referencia al tiempo de operación, el aparato de aire acondicionado se mantiene encendido un promedio de 16 horas al día. Si se comparan los porcentajes mencionados anteriormente con los porcentajes del primer conglomerado y con los de la ciudad se puede decir que la diferencia entre hogares de los conglomerados radica en que el número de hogares que utilizan el aire acondicionado con una temperatura óptima o sobre la temperatura óptima es mayor con excepción del segundo conglomerado.

En el tema del interés por el ahorro de energía eléctrica, los hogares de este conglomerado comparten características con los hogares del primer y segundo conglomerado respecto a la

cantidad de prácticas que realizan, en el principal medio por el cual se informan acerca de modos de ahorrar energía, en la principal forma en la que conocen su consumo eléctrico y en la cantidad y en el principal programa de ahorro de energía que conocen. Sin embargo, en este caso 20% de los hogares conocen su consumo de energía eléctrica lo que los coloca en el segundo lugar en este aspecto, pero al mismo tiempo muestran la mayor participación en programas que promueven el ahorro de energía, porque el 33% de los hogares al menos han utilizado alguno.

Con lo anterior se sostiene que, aunque los hogares de este conglomerado comparten características similares con los otros en conocimiento, la diferencia se encuentra en que en este conglomerado sí se utilizan los programas que promueven el ahorro de energía. Debido a las formas de consumo de energía eléctrica de estos hogares, se registra que en verano se paga en promedio \$1324.75 pesos y en invierno \$615.93 pesos, siendo los valores per cápita de \$360.47 pesos en verano y \$170.71 pesos en invierno.

5.4 Comparativa entre los estilos de vida.

Junto a los resultados explicados por estilo de vida, se obtienen las siguientes tablas comparativas cuya finalidad es la de poder visualizar y ampliar el análisis de la información.

5.4.1 Los hogares de acuerdo al estilo de vida.

En la tabla 2 es posible observar que los hogares que forman parte de los estilos de vida tienen características similares en tanto los años de residencia en Mexicali, el número de personas por hogar y las horas que la vivienda se encuentra ocupada durante el día.

Tabla 2. Características de los hogares por estilo de vida.

		Promedio	Mínimo	Máximo
Años viviendo en Mexicali.	EV1	39	2	80
	EV2	35	0	87
	EV3	34	0	75
	Total	36	0	87
Personas por hogar	EV1	4	1	8
	EV2	3	1	6
	EV3	4	1	7
	Total	4	1	8
Horas vivienda ocupada	EV1	19	5	24
	EV2	19	4	24
	EV3	19	0	23
	Total	19	0	24

Debido a esto, se comenta que no son características que intervengan en la distinción de cada estilo de vida, a su vez en la tabla 3 es posible observar que la mayoría de los hogares cuentan con una vivienda propia, lo cual pudiera ser crucial al momento de elegir la introducción de una cierta tecnología relacionada con el ahorro de energía eléctrica a la vivienda.

Tabla 3. Tipo de propiedad de las viviendas por estilo de vida.

	Propia		Rentada		Prestada	
EV1	58	89.20%	6	9.20%	1	1.50%
EV2	68	75.60%	16	17.80%	6	6.70%
EV3	106	89.80%	9	7.60%	3	2.50%
Total	232	85.00%	31	11.00%	10	4.00%

También se comparten características como el tipo de hogar de acuerdo con la clasificación de INEGI, en este aspecto se destaca que la mayoría de los hogares son nucleares o ampliados, sin embargo, en el estilo de vida 2 existe también presencia de hogares unipersonales.

Cabe señalar también que el nivel de escolaridad de los hogares si muestra una variación, ya que para el estilo de vida 1 se tienen primaria y universidad como principales niveles de estudio, para el estilo de vida 2 se tiene primaria y secundaria y finalmente para el estilo de vida 3 secundaria y universidad siendo también el estilo de vida con mayor nivel de posgrado.

5.4.2 Las prácticas proambientales de acuerdo al estilo de vida.

El total de prácticas proambientales que se llevan a cabo por estilo de vida se encuentran expresadas en la tabla 4, como se describió anteriormente de manera individual, el estilo de vida 3 es el que tiene una mayor participación en este tipo de actividades, seguido del estilo de vida 2 y finalmente el estilo de vida 1.

Tabla 4. Cantidad de prácticas proambientales por estilo de vida.

		Prácticas posibles	Prácticas realizadas	Porcentaje
Prácticas amigables con el medio ambiente	EV1	390	199	51.00%
	EV2	540	288	57.80%
	EV3	708	627	88.60%
	Total	1638	1138	69.50%

A partir de la tabla 5 se puede encontrar que llevar a cabo prácticas relacionadas con el ahorro de agua se mencionan continuamente en los hogares analizados, seguido de prácticas para el ahorro de energía eléctrica el cual se lleva a cabo en un 84.2% de los hogares, no obstante, el estilo de vida 2 muestra poca preocupación por este aspecto ya que solamente el 64% de los hogares mencionaron que llevaban a cabo prácticas para ahorrar luz en su vida diaria.

Tabla 5. Prácticas proambientales llevadas a cabo por estilo de vida.

		Número de hogares	Hogares que realizan la practica	Porcentaje
Realiza actividades comunitarias para el cuidado del medio ambiente	EV1	65	17	26.20%
	EV2	90	12	13.30%
	EV3	118	77	65.30%
	Total	273	106	38.80%
Realiza actividades de reciclaje	EV1	65	27	41.50%
	EV2	90	41	45.60%
	EV3	118	111	94.10%
	Total	273	179	65.60%
Realizar actividades de ahorro agua	EV1	65	50	76.90%
	EV2	90	82	91.10%
	EV3	118	115	97.50%
	Total	273	247	90.50%
Realiza actividades para ahorrar luz	EV1	65	55	84.60%
	EV2	90	58	64.40%
	EV3	118	117	99.20%
	Total	273	230	84.20%
Compra productos amigables con el medio ambiente	EV1	65	9	13.80%
	EV2	90	21	23.30%
	EV3	118	100	84.70%
	Total	273	130	47.60%
La movilidad amigable con el medio ambiente	EV1	65	41	63.10%
	EV2	90	74	82.20%
	EV3	118	107	90.70%
	Total	273	222	81.30%

En este mismo sentido, también destaca que los estilos de vida 1 y 2 tienen una baja participación

comunitaria en actividades para el cuidado del medio ambiente, así como una escasa adquisición de productos también amigables con el medio ambiente.

5.4.3 Las prácticas de ahorro y consumo de energía eléctrica de acuerdo al estilo de vida.

Los porcentajes correspondientes al conjunto de prácticas de ahorro y consumo de energía eléctrica que son realizadas por cada estilo de vida pueden ser observados en la tabla 6, estos muestran una gran similitud, ya que todos los estilos de vida realizan de forma positiva más de la mitad de las prácticas que tienen a su alcance para ahorrar energía eléctrica, no obstante, el estilo de vida 3 es el que tiene una mayor participación, seguido del estilo de vida 1 y finalmente el estilo de vida 2, por otra parte, estas prácticas se pueden analizar a través de la tabla 7 en donde se pueden encontrar los porcentajes de participación de los estilos de vida en cada una de ellas.

Tabla 6. Cantidad de prácticas de ahorro y de consumo de energía eléctrica por estilo de vida.

		Prácticas posibles	Prácticas realizadas	Porcentaje
Prácticas de ahorro de energía eléctrica	EV1	1105	683	61.80%
	EV2	1530	935	61.10%
	EV3	2006	1335	66.60%
	Total	4641	2953	63.60%

Tabla 7. Prácticas de ahorro y consumo de energía eléctrica por estilo de vida.

		No. de hogares	Hogares que realizan la practica	Porcentaje
Apagan las luces cuando no las necesitan	EV1	65	60	92.30%
	EV2	90	82	91.10%
	EV3	118	115	97.50%
	Total	273	257	94.10%
Apagan los aparatos eléctricos cuando no los utilizan	EV1	65	54	83.10%
	EV2	90	82	91.10%
	EV3	118	109	92.40%
	Total	273	245	89.70%
Desconectan los aparatos eléctricos cuando no los utilizan	EV1	65	36	55.40%
	EV2	90	46	51.10%
	EV3	118	76	64.40%
	Total	273	158	57.90%
Le dan mantenimiento a los aparatos e instalaciones eléctricas	EV1	65	43	66.20%
	EV2	90	57	63.30%
	EV3	118	90	76.30%
	Total	273	190	69.60%
Guarda los alimentos en el refrigerador cuando ya se han enfriado	EV1	65	53	81.50%
	EV2	90	74	82.20%
	EV3	118	101	85.60%
	Total	273	228	83.50%
Abre la puerta del refrigerador lo menos posible y por poco tiempo	EV1	65	50	76.90%
	EV2	90	76	84.40%
	EV3	118	95	80.50%
	Total	273	221	81.00%
Utilizan lo menos posible microondas, tostador y aspiradora	EV1	65	43	66.20%
	EV2	90	60	66.70%
	EV3	118	96	81.40%
	Total	273	199	72.90%
Planchan la mayor cantidad de ropa en una sola vez	EV1	65	45	69.20%
	EV2	90	62	68.90%
	EV3	118	82	69.50%
	Total	273	189	69.20%
Usan lavadora con cargas completas	EV1	65	45	69.20%
	EV2	90	58	64.40%
	EV3	118	90	76.30%
	Total	273	193	70.70%
Cuentan con focos ahorradores en su vivienda	EV1	65	53	81.50%
	EV2	90	73	81.10%
	EV3	118	100	84.70%
	Total	273	226	82.80%
Cuentan con calentador solar de agua en su vivienda	EV1	65	0	0.00%
	EV2	90	0	0.00%
	EV3	118	0	0.00%
	Total	273	0	0.00%
Cuentan con Luminarias o paneles solares en su vivienda	EV1	65	6	9.20%
	EV2	90	2	2.20%
	EV3	118	13	11.00%
	Total	273	21	7.70%
Cuentan con algún aparato ahorrador eléctrico	EV1	65	7	10.80%
	EV2	90	1	1.10%
	EV3	118	12	10.20%
	Total	273	20	7.30%
Uso de calefacción en el hogar	EV1	65	10	15.40%
	EV2	90	8	8.90%
	EV3	118	10	8.50%
	Total	273	28	10.30%

Según la información obtenida, apagar las luces cuando no se necesitan, apagar los aparatos que no se utilizan, guardar los alimentos ya fríos en el refrigerador y contar con focos ahorradores son las principales fuentes de ahorro de energía eléctrica en los hogares, todas estas prácticas se encuentran arriba del 80% de participación, inclusive los estilos de vida muestran un porcentaje muy parecido en ellas, sin embargo, el rubro de las tecnologías eficientes y de uso de energías alternas se encuentra con una participación muy por debajo de las otras prácticas, inclusive destaca que en ninguno de los casos se encontró el uso de calentadores solares de agua. También es notable que las prácticas relacionadas con el mantenimiento de las instalaciones eléctricas, el lavado y planchado de la ropa y desconectar los

aparatos que no se están utilizando muestran una participación que ronda entre el 60 y el 70%.

Algo también que se puede destacar es que en cada estilo de vida se encontró el uso de prácticas de ahorro de energía que no se consideraban como tal a partir del instrumento utilizado para recolectar la información, estas prácticas se encuentran en la tabla 8, y muestran que existen prácticas compartidas entre los estilos de vida, pero en particular destacan el sellado de puertas y ventanas, un uso consciente (incluso limitado) de los aparatos de aire acondicionado, y la preferencia por el ventilador.

Tabla 8. Otras prácticas de ahorro de energía eléctrica por estilo de vida.

	Número de hogares	Hogares que realizan otras prácticas	Porcentaje	Prácticas realizadas
EV1	65	7	10.80%	Encender únicamente el A/C de la habitación en uso, limitar el uso del A/C
EV2	90	11	12.20%	Abrir las ventanas y las puertas, utilizar el patio de la vivienda en las tardes, utilizar reductores de voltaje, utilizar el ventilador en lugar del A/C, encender únicamente el A/C de la habitación en uso
EV3	118	14	11.90%	Sellar puertas y/o ventanas, encender únicamente el A/C de la habitación en uso, refrescarse con agua, utilizar ventilador en lugar del A/C
Total	273	32	11.70%	

5.4.4 Los aparatos de aire acondicionado de acuerdo al estilo de vida.

El tiempo de uso de los aparatos de aire acondicionado de acuerdo con el estilo de vida se expone en la tabla 9.

Tabla 9. Promedio de uso de aparatos de aire acondicionado al día durante el verano.

	Número de hogares	Promedio de horas
EV1	65	17.42
EV2	90	14.86
EV3	118	16
Total	273	15.96

El uso resulta similar en los tres estilos de vida, incluso si se observa la tabla 10 se puede encontrar que las actividades que involucran el

mantenimiento y la operación del aire acondicionado también son similares.

Tabla 10. Prácticas de uso y mantenimiento del aire acondicionado por estilo de vida.

		Número de hogares	Hogares que realizan la práctica	Promedio
Le dan mantenimiento anual a sus aparatos de A/C	EV1	65	62	95.40%
	EV2	90	83	92.20%
	EV3	118	114	96.60%
	Total	273	259	94.90%
Limpian periódicamente los filtros del A/C (al menos 2 veces al mes)	EV1	65	55	84.60%
	EV2	90	79	87.80%
	EV3	118	110	93.20%
	Total	273	244	89.40%
Vigilan que puertas y ventanas se encuentren cerradas cuando prende el A/C	EV1	65	64	98.50%
	EV2	90	83	92.20%
	EV3	118	118	100.00%
	Total	273	265	97.10%

Pero lo anterior cambia cuando se hace referencia al tipo de aire acondicionado que se utiliza con mayor frecuencia por estilo de vida.

En particular, el estilo de vida 1 muestra una preferencia por los mini Split, seguido de los aires acondicionados de ventana y finalmente los aires acondicionados de paquete. El estilo de vida 2 muestra que los hogares cuentan con aire acondicionado de ventana principalmente, seguido de los mini Split y es destacable que es el estilo de vida donde se encuentra también el uso de *coolers* y donde hay casos donde no utilizan ningún equipo de climatización. En el caso del estilo de vida 3 se

prefieren los mini Split seguido de los aires acondicionados de ventana.

Tabla 11. Tipo de aire acondicionado por estilo de vida.

	EV1	EV2	EV3
Paquete	18 27.70%	11 12.20%	13 11.00%
Ventana	20 30.80%	51 56.70%	47 39.80%
Mini Split	26 40.00%	18 20.00%	54 45.80%
Cooler	1 1.50%	8 8.90%	3 2.50%
No tiene	0 0.00%	2 2.20%	1 0.80%

5.4.5 El interés y conocimiento del ahorro de energía eléctrica de acuerdo al estilo de vida.

Existen temas que fueron abordados en la encuesta aplicada y que muestran el interés que se tiene por conocer aspectos como el consumo de energía eléctrica, y algunas otras estrategias que promuevan el ahorro energético, aunque esto no siempre es así.

En la tabla 12 se puede observar el gran desconocimiento existente con relación al consumo eléctrico en los hogares, se puede decir que en muy pocos se está consciente de su consumo eléctrico y a pesar de que existen diversos medios por los que los hogares reportan que se enteran de formas de ahorro y de programas gubernamentales creados para disminuir el consumo energético, (tabla 13 y tabla 14) no se ve reflejado en la participación de alguno de los programas como se observa en la tabla 15.

Tabla 12. Principal medio por el que los hogares se informan sobre su consumo de energía eléctrica

	Académico	Aparatos	Etiquetas	Medidor	Recibo
EV1	0 0.00%	1 1.50%	0 0.00%	0 0.00%	14 21.50%
EV2	0 0.00%	1 1.10%	5 5.60%	1 1.10%	9 10.00%
EV3	2 1.70%	2 1.70%	2 1.70%	2 1.70%	16 13.60%
Total	2 0.70%	4 1.50%	7 2.60%	3 1.10%	39 14.30%

Tabla 13. Medios por los que los hogares se enteran de prácticas de ahorro de energía.

	EV1	EV2	EV3	Total
Hogares	65	90	118	273
Total de medios mencionados	91	108	163	362
Promedio de medios mencionados	1.4	1.2	1.37	1.32
	Menciones	Menciones	Menciones	Menciones
T.V.	47 51.65%	62 57.41%	90 55.21%	199 54.97%
Folletos	14 15.38%	12 11.11%	18 11.04%	44 12.15%
Radio	9 9.89%	7 6.48%	14 8.59%	30 8.29%
Periódico	4 4.40%	8 7.41%	12 7.36%	24 6.63%
Internet	4 4.40%	1 0.93%	9 5.52%	3 3.87%
Recibo	2 2.20%	4 3.70%	3 1.84%	8 2.49%
Etiquetas	1 1.10%	1 0.93%	0 0.00%	2 0.55%
Social	10 10.99%	13 12.04%	17 10.43%	40 11.05%

Tabla 14. Principales programas de ahorro energético conocidos en los hogares.

	EV1	EV2	EV3	Total
Hogares	65	90	118	273
Total de programas mencionados	42	54	112	208
Promedio de programas mencionados	0.65	0.6	0.95	0.76
	Menciones	Menciones	Menciones	Menciones
ASI	30 71.40%	35 64.80%	80 71.40%	199 69.70%
FIDE	5 11.90%	7 13.00%	12 10.70%	24 11.50%
FIPATERM	6 14.30%	8 14.80%	15 13.40%	29 13.90%
PAESE	0 0.00%	1 1.90%	0 0.00%	1 0.50%
Subsidio	1 2.40%	2 3.70%	3 2.70%	6 2.90%
Tarjetas de apoyo	0 0.00%	1 1.90%	2 1.80%	3 1.40%

Tabla 15. Participación en programas de ahorro eléctrico.

		Total de hogares	porcentaje	
Uso de algún programa de ahorro en el hogar	EV1	65	11	16.9%
	EV2	90	11	12.2%
	EV3	118	39	33.1%
	Total	273	61	22.3%

A partir de los resultados obtenidos por conglomerado se puede resumir el comportamiento de los estilos de vida en los principales temas analizados. [Figura 2]

	% Población	Nivel socioeconómico	Actitud proambiental	Ahorro de energía eléctrica	Uso de aire acondicionado	Interés en el ahorro de energía	Pago promedio de energía eléctrica
Estilo de vida 1	23.8	Medio y medio alto	1	2	1	2	\$1749
Estilo de vida 2	33	Medio y medio bajo	2	1	2	1	\$550
Estilo de vida 3	43.2	Medio y medio bajo	3	3	3	3	\$970

Figura 2. Comparativo de estilos de vida y lugar escalar (1 al 3) en el que se ubican conforme a los resultados presentados **Fuente:** Elaboración propia.

Es posible visualizar la relación entre la actitud proambiental, el ahorro de energía eléctrica y el pago promedio por consumo de energía eléctrica de los tres estilos de vida. [Figura 3]

El primer estilo de vida presenta una baja actitud proambiental, lo que permite explicar las pocas prácticas de ahorro de energía y por lo tanto un elevado pago por consumo de energía eléctrica. El segundo estilo de vida presenta un fenómeno distinto, ya que a pesar de que cuenta con una mediana actitud proambiental presenta pocas prácticas de ahorro, sin embargo, el pago por consumo de energía eléctrica es el menor de los tres estilos de vida, lo que puede ser atribuido a que es el estilo de vida donde la mayoría de los hogares utilizan el aire acondicionado con una temperatura igual o sobre la temperatura recomendada y

además utilizan menos tiempo el aire acondicionado. El tercer estilo de vida muestra predominantemente una actitud proambiental, un alto número de prácticas de ahorro de energía en los hogares y un consumo de energía eléctrica medio.

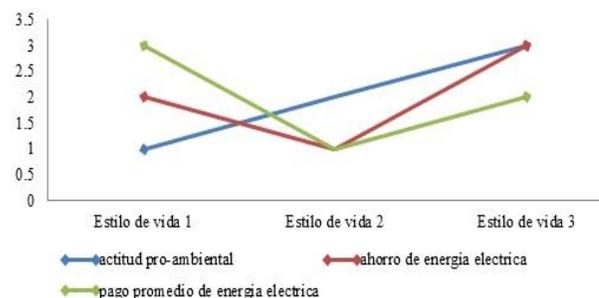


Figura 3. Relación entre la actitud proambiental, el ahorro de energía eléctrica y el pago promedio por consumo de energía eléctrica por estilo de vida **Fuente:** Elaboración propia.

Es posible exponer que el eje rector en el comportamiento referente al consumo de energía eléctrica para la ciudad de Mexicali, es el ahorro, ya que todos los hogares, independientemente del estilo de vida al que pertenezcan, llevan a cabo alguna práctica de ahorro de energía eléctrica, ya sea a través de la adquisición de algún aparato eficiente o de la realización de una actividad, esto va de la mano con las investigaciones revisadas anteriormente en donde fue posible encontrar la presencia de estas distintas formas de ahorro de energía eléctrica.

En cada estilo de vida es posible distinguir una actitud proecológica en mayor o menor grado, esta actitud contribuye junto con el nivel socioeconómico y la escolaridad a la generación de comportamientos distintos respecto a las prácticas de ahorro de energía que se realizan en los hogares, la forma en la que se utilizan algunos aparatos eléctricos y en el interés que los hogares muestran por el tema.

Es posible explicar lo anterior a partir de la manera en la que Bourdieu aborda los estilos de vida. Partiendo de que cada estilo de vida es un sistema de prácticas generadas, dotadas de sentido, apreciadas y percibidas por acción del *habitus*, por la acumulación de capital y por la posición de los agentes en el campo social. Es posible decir que la orientación de un estilo de vida a llevar o no a cabo prácticas proecológicas es producto de la dinámica *habitus – capital – campo*, en donde el gusto interviene como el traductor de las elecciones en signos calificados socialmente.

Con base en lo anterior es posible exponer que un estilo de vida proecológico, entendido como aquel orientado a realizar prácticas que participan del cuidado del medio ambiente, se caracterizará porque los agentes que forman parte de este estilo de vida buscarán también realizar prácticas orientadas hacia el ahorro de energía y mostrarán un elevado interés por informarse acerca del tema.

Siguiendo la teoría social de Bourdieu, un hogar que se encuentre orientado a llevar un estilo de vida proecológico, que muestre una cierta acumulación de capital y que tenga una determinada posición en el campo social estará predispuesto a realizar o no ciertas prácticas de ahorro de energía y a buscar información al respecto, por ejemplo, un hogar donde se posea una elevada actitud proambiental, estará mayormente predispuesto a llevar a cabo prácticas de ahorro de energía, como apagar los focos que no se utilicen, usar los aparatos eléctricos de manera racional o a elegir una cierta clase de aparato eléctrico al momento de comprar uno, sin olvidar que en la decisión intervendrán también la acumulación de capitales y la posición que guarde respecto al campo social en el que se le ubique. En cambio, un hogar que no tenga una orientación proambiental, difícilmente orientará sus prácticas hacia el ahorro de energía, por ejemplo, al momento de comprar un aparato, al usarlo o al darle mantenimiento, o bien, al buscar información acerca del tema del ahorro de energía, aunque su acumulación de capital y la posición en el campo social se lo permita.

6. Conclusiones

Como conclusión es posible exponer que, para los hogares de la ciudad de Mexicali, B.C. el tema del ahorro de energía eléctrica es de suma importancia, esto se demuestra en la participación que se observa en cada uno de los estilos de vida. Se encontró que las prácticas proambientales juegan un papel crucial en la orientación de los estilos de vida hacia las prácticas de ahorro de energía tal como Bourdieu lo expone en su teoría. Es decir, las prácticas proambientales en conjunto, entendidas como una conducta proambiental, orientan las prácticas de consumo de energía eléctrica hacia el ahorro eléctrico.

El tipo y la cantidad de prácticas de ahorro de energía eléctrica que se lleven a cabo en un hogar variarán no sólo entre hogares con estilos de vida diferentes, sino que también variarán entre los hogares que comparten un mismo estilo de vida. No obstante, a través de los resultados obtenidos en este estudio, se encontró que para el ahorro de energía eléctrica en los hogares la conducta proecológica, junto con el ingreso, - tal como lo plantea el trabajo de Sáñez - es una variable importante a tomar en cuenta ya que permite replantear algunos de los esfuerzos de los programas de ahorro de energía con el fin de tener más alternativas para promover el ahorro de energía eléctrica.

En el presente trabajo se pudo abordar solamente la parte cuantitativa del estudio, principalmente debido a la premura del tiempo, no obstante, queda la posibilidad de, a partir de la teoría de Bourdieu, continuar con la investigación indagando acerca de la forma en la que se construyen estas prácticas proambientales, de consumo y de ahorro de energía eléctrica con el fin de encontrar su lógica y utilizar este conocimiento para tratar de comprender la forma en la que se realizan las elecciones.

7. Reconocimiento de autoría

David Alejandro Becerril: Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Curación de Datos; Escritura -Borrador original; Escritura: revisión y edición; Administración de proyecto. *Judith Ley García*: Conceptualización; Ideas; Metodología; Recursos; Escritura: revisión y edición; Supervisión.

Referencias

[1] E. Menéndez. *Energía y conflictos internacionales: Políticos, Tecnología y Cooperación*. España: Netbiblo, 2005.

[2] S. Ahumada y A. Sáñez. "Sociedad, cultura y ahorro de energía eléctrica en Baja California." *Paradigmas*, no. 29, pp. 35-40, ene. 2000.

[3] A. Quintanilla y D. Fischer. *La energía eléctrica en Baja California y el futuro de las renovables. Una visión multidisciplinaria*. Hermosillo, México: Departamento editorial de la Universidad Autónoma de Baja California, 2003.

[4] R. Romero. *Vivienda y consumo de energía eléctrica en zonas áridas. El caso de Mexicali*. Mexicali, México: Departamento Editorial de la Universidad Autónoma de Baja California, 2011.

[5] J. Sosa. *Política de precios y energía para el municipio de Mexicali: Un análisis de insumo - producto*. México: Departamento editorial de la Universidad Autónoma de Baja California, 2007.

[6] A. Sáñez. *Vivienda y consumo de energía eléctrica en zonas áridas. El caso de Mexicali*. Mexicali, México: Instituto de Investigaciones Sociales - UABC, 1996.

[7] C. Starr. "Choosing our energy future." *Perspectives on energy. Issues, Ideas and Environmental Dilemma*, 3rd ed., L. Ruedisili y M. Firebaugh, Eds. New York: Oxford University Press, 1982.

[8] S. Ricossa. *Diccionario de economía*. México: Siglo Veintiuno editores, 1990.

[9] A. Sáñez. "Contexto de la política tarifaria residencial del sector eléctrico y estimación de la función consumo eléctrico residencial: El caso de Mexicali, Baja California (1990-1992)." *Estudios Fronterizos*, no. 37-38, pp. 85-136, 1996. <https://doi.org/10.21670/ref.1996.37-38.a04>

[10] D. Chiras. *Lessons from nature learning to live sustainably on the earth*. Estados Unidos: Island Press, 1992.

[11] C. Sheinbaum. *Tendencias y perspectivas de la energía residencial en México*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.

https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000217144

[12] R. Friedmann y C. Sheinbaum, "MEXICAN ELECTRIC END-USE EFFICIENCY: Experiences to Date." *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 23, no. 1, nov. 1998. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.23.1.225>

[13] J. Morales, M. Valdés, A. Ortega, A. Muhlia, J. Bravo y A. Leyva. *Estudio para el ahorro de energía de edificios para la ciudad de México*. México: Facultad de Arquitectura, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 1998.

[14] W. F. Van Raaij and T. M. M. Verhallen. "A behavioral model of residential energy use." *Journal of Economic Psychology*, vol. 3, No. 1, ene. 1983. [https://doi.org/10.1016/0167-4870\(83\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0167-4870(83)90057-0)

[15] A. Rapoport. (1969). *House Form and Culture*. [En línea]. Disponible: <https://bibliodarq.files.wordpress.com/2016/05/rapoport-amos-house-form-and-culture.pdf> [Sep 10, 2021]

[16] E. Leff. "Sobre la articulación de las ciencias en la relación naturaleza-sociedad." en *Biosociología y articulación de las ciencias*, México: Universidad Nacional Autónoma de México, 1981, pp. 13-66.

[17] I. Sachs. *Ecodesarrollo: Desarrollo sin destrucción*. México: El Colegio de México, 1982.

[18] J. C. Cramer *et al.* "Structural-behavioral determinants of residential energy use: Summer electricity use in Davis." *Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 207-216, mar. 1984. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(84\)90108-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(84)90108-7)

[19] G. Hitchcock. "An integrated framework for energy use and behavior in the domestic sector." *Energy and Buildings*, vol. 20, no. 2, pp. 151-157, ene. 1993. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(93\)90006-G](https://doi.org/10.1016/0378-7788(93)90006-G)

[20] P. Bourdieu y L. Wacquant. *Una invitación a la sociología reflexiva*. Argentina: Siglo XXI Editores, 2005.

[21] P. Bourdieu. *La distinción, criterio y bases sociales del gusto*. Madrid, España: Santillana, 1998.

[22] P. Bourdieu, *El sentido práctico*. Argentina: Siglo XXI, 2007.

[23] P. Bourdieu, *Razones prácticas. Sobre la teoría de la acción*. 4ta ed. Barcelona, España: Anagrama, 2007.

[24] G. Giménez. (2002, enero). "Introducción a la sociología de Pierre Bourdieu." *Colección Pedagógica Universitaria*. [En línea]. no. 37-38, pp. 1-11. Disponible https://www.uv.mx/cpue/colped/N_3738/B%20Gilberto%20Gimenez%20Introduccion%202.pdf [jun. 20, 2021].

[25] H. Ramírez. (2002). "Acondicionamiento físico y estilos de vida saludable." *Colombia Médica*. [En línea]. vol. 33, no. 1, pp. 3-5. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28333101> [sep. 2021].

[26] I. Salazar y M. Arrivillaga. (2004). "El consumo de alcohol, tabaco y otras drogas, como parte del estilo de vida de jóvenes universitarios." *Revista Colombiana de Psicología*. [En línea]. no. 13, pp. 74-89. Disponible: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=80401309> [Ago. 2021].

[27] M. Pardo-Torres y N. Nuñez-Gomez. (2008). "Estilo de vida y salud en la mujer adulta joven." *Aquichan*. [En línea]. vol. 8, no. 2. Disponible: <https://aquichan.unisabana.edu.co/index.php/aquichan/article/view/153/291> [sep. 2021].

[28] L. Guerrero y A. León. *Estilo de vida y salud*. EDUCERE, 2010.

[29] J. Rodríguez y E. Agullo. (1999). "Estilos de vida, cultura, ocio y tiempo libre de los estudiantes universitarios." *Psicothema*. [En línea]. vol. 11, no. 2, pp. 247-259. Disponible:

<http://www.psicothema.com/pdf/204.pdf> [sep. 2021].

[30] A. Corro-Velásquez y J. Olivares-Ponce, "Estilos de vida y consumo de un producto de marca en jóvenes universitarias." *Ciencias Económicas Administrativas*, vol. 8, no. 8, 2009.

[31] C. Weber, A. Schwarze, B. Gebhardt, K. Hauser, y S. Schroedl. "Lifestyles and Energy Use: Are Eco-Pioneers Different from Mr. and Mrs. Average." *Actas de ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, 2000, pp. 409-420.

[32] V. Corral, C. Tapia, B. Fraijo, J. Mireles, y P. Márquez. (2008). "Orientación a la sustentabilidad como determinante de los estilos de vida sustentables: un estudio con una muestra mexicana." *Sociedad Mexicana de Psicología A.C.* [En línea] vol. 25, no. 2. Disponible:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=243016308011> [ago. 2021].

[33] V. Corral. *Comportamiento proambiental*. Tenerife: Resma, 2001.

[34] J. Aksen, J. TyreeHageman, and A. Lentz, "Lifestyle practices and pro-environmental technology." *Ecological Economics*, pp. 64-74, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.07.013>

[34] C. Palmborg, *Energy and Lifestyle: A comparative Analysis*. European Council for an Energy Efficient Economy, 1995.

[35] H. Jeeninga, B. Huenges, Netherlands Energy Research Foundation, y Agency for Energy and Environment. *Domestic Electricity Consumption and Lifestyle*. European Council for an Energy Efficient Economy, 1999.

[36] L. Lutzenhiser y M. Hill, *Lifestyle, status and Energy Consumption*. European Council for an Energy Efficient Economy., 2000.

[37] S. Servicio Nacional del Consumidor. *Comportamiento de consumo energético, en Familias Urbanas Tipo del Gran Santiago*. Chile: Gobierno de Chile, 2005.

[38] W. Fong, H. Matsumoto, Y. Lun, and R. Kimura, "Household Energy Consumption under Different Lifestyles." *Actas de 9th REHVA World Congress Clima 2007 Wellbeing Indoors*, 2007.

Derechos de Autor (c) 2022 David Alejandro Becerril, Judith Ley García.



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](#)



Master-slave synchronization in the Rayleigh and Duffing oscillators via elastic and dissipative couplings

Sincronización maestro-esclavo en los osciladores Rayleigh y Duffing mediante acoplamientos elásticos y disipativos

Ulises Uriostegui-Legorreta , Eduardo Salvador Tututi-Hernández 

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mújica S/N, C.P. 58060, Morelia, Michoacán, México

Corresponding author: Ulises Uriostegui Legorreta, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mújica S/N, C.P. 58060, Morelia, Michoacán, México. E-mail: uli_mat@hotmail.com. ORCID: [0000-0001-9905-6060](https://orcid.org/0000-0001-9905-6060)

Received: November 17, 2021

Accepted: February 4, 2022

Published: February 16, 2022

Abstract. - *In this work a master-slave configuration to obtain synchronization between the Rayleigh and the Duffing oscillators is studied. For this configuration, we analyze the system when the dissipative coupling and one that combines the elastic and dissipative couplings are used. We analyzed the coupling parameters to find the range where synchronization between the oscillators is achieved. We found synchronization in the oscillators for large values of the coupling parameter. Our numerical findings show that for the dissipative coupling, there exists partial synchronization while for the others there is complete synchronization.*

Keywords: Nonlinear dynamics; Control of chaos; Synchronization.

Resumen. - *En este trabajo se estudia una configuración maestro-esclavo para obtener sincronización entre los osciladores Rayleigh y Duffing. Para esta configuración, analizamos el sistema cuando se utiliza el acoplamiento disipativo y uno que combina los acoplamientos elástico y disipativo. Analizamos los parámetros de acoplamiento para encontrar el rango donde se logra la sincronización entre los osciladores. Encontramos sincronización en los osciladores para valores grandes del parámetro de acoplamiento. Nuestros hallazgos numéricos muestran que para el acoplamiento disipativo existe una sincronización parcial mientras que para los demás existe una sincronización completa.*

Palabras clave: Dinámica no lineal; Control del caos; Sincronización.



1. Introduction

Since the seminal work of Pecora and Carroll on synchronization [1], numerous works on chaos that comprises diverse areas such as lasers, chemical reactions, electronic circuits, biological systems, among others, have been studied. In particular, low-dimensional systems have been of interest in order to understand the synchronization and chaotic behavior in nature. The most studied and representative systems are the Lorenz, Chua, Rössler, van der Pol, Rayleigh, Duffing and their variations [2-7].

The Rayleigh oscillator is much like the van der Pol oscillator. The Rayleigh and Duffing oscillators are the paradigmatic circuits to study chaos in systems of low-dimensional. The first gives a limit cycle and the last provides the prototype of a strange attractor. It is well known, that a limit cycle is a closed trajectory in phase space having the property that at least one other trajectory spirals into it, when $t \rightarrow \pm\infty$. In other words, the limit cycle is an isolated trajectory; it spirals either towards or away from the limit cycle. An attractor is called strange if it has a fractal structure. This is often the case when the dynamics on the attractor is chaotic. If a strange attractor is chaotic, it exhibits sensitive dependence on the initial conditions. Studies focused on the Rayleigh oscillator reveal that it possesses a rich dynamical structure, especially when the oscillator is forced. This system exhibits complex bifurcation structures with an important number of periodic states, a chaotic region and islands of periodic states, showing, in addition, transitions from chaos to stable states. The dynamics based on identical or distinct linear oscillators presenting the same kind of attractors is still under study [8,9]. Nevertheless, the dynamics of these systems in states of different attractors is of current interest and it could give rise to important information. The control of chaos is concerned with using some designed

control to modify the characteristics of a nonlinear system. A number of methods such as active control, adaptive control, optimal control and sliding mode control exist for the control of chaos in systems [10-13]. Several kinds of synchronization play an important role in the study of chaos such as phase synchronization, anticipated synchronization, generalized synchronization, projective synchronization, that have been studied and applied to a chaotic and unified system by *J. Yan et. al* [14]. *A. Razminia et. al* [15] have obtained complete synchronization in chaotic systems of fractional order through sliding mode control. *A. Ouannas et. al* [16] present new approaches to study coexistence of some kinds of synchronization between hyperchaotic systems such as hybrid synchronization and anti-synchronization. *E. Campos et. al* [17] analyzed the multimodal synchronization on the master-slave configuration. *J.S. González et. al* [18] studied the synchronization between two different coupled chaotic oscillators with an external force. The itinerary synchronization between piecewise linear systems with different number of attractors was studied by *A. Anzo-Hernández et. al* [19]. The hybrid function projective synchronization of chaotic systems has been developed and used on systems where the parameters of the system are unknown by applying adaptive control, *A. Khan et. al* [20]. *A. Karimov et. al* [21] have studied the adaptive generalized synchronization between an analog circuit and a computer model by comparing the numerical methods used on the computer simulation of chaotic systems.

Some applications of the Rayleigh and Duffing oscillators go from physics to biology, electronics, chemistry and many other fields. For instance, a possible application of synchronization in chaotic signals is to implement secure communication systems, since chaotic signals are usually broadband, noise like,



and difficult to predict the behavior. They can also be used for masking information bearing waveforms [22,23,24]. In robotics, the oscillators have been included to control joint hips and knees of human-like robots to ensure the mechanical system follows the right path. The generated signals can be used as reference trajectories for the feedback control [25,26]. Other application is in artificial intelligence. In fact, the oscillators have shown usefulness to training neuronal network and recognition of chaotic systems [27,28].

As far as the coupling between the Rayleigh and Duffing oscillators is referred, we can mention three different couplings, namely: gyroscopic, dissipative and elastic [29-34]. Among the diverse way of coupling, the most used are the elastic and dissipative ones [34,35,36]. In a previous work [34], it is analyzed a different approach of synchronizing two distinct oscillators of low-dimensional, using the aforementioned couplings. *Uriostegui et. al* [37] studied synchronization between the van der Pol and Duffing oscillators by using the elastic, dissipative and a combination of both couplings. It was found that the elastic coupling leads to no synchronization, whilst with the dissipative one it is reached partial synchronization. For the combination of both couplings, it is reached complete synchronization.

In this work, we study and compare two types of couplings by using the Rayleigh and Duffing systems: the dissipative and the used previously by *Uriostegui et. al* [34]. It is important to remark that the studies in the literature on this kind of synchronization is based only on one coupling. An outline of this work is as follows. In Sec. 2, it is briefly studied the main features of the Rayleigh and Duffing oscillators. In Sec. 3, we study and compare two types of couplings using the Rayleigh and Duffing systems upon the

master-slave configuration. In Sec. 4, some conclusions and an outlook are presented.

2. Dynamics of the oscillators

The dynamics of the forced Rayleigh oscillator is described by the following nonlinear differential equation:

$$\ddot{x} - \mu(1 - \dot{x}^2)\dot{x} + \frac{dU_1}{dx} = A_1 \cos(\omega_1 t), \quad (1)$$

The Rayleigh oscillator is characterized by nonlinear damping. The x variable denotes the position, t the time, and $\mu > 0$ is a parameter that governs the nonlinearity and damping. The external forcing is given by the harmonic function, with amplitude A_1 and frequency ω_1 . We have defined the function:

$$U_1(x) = \frac{1}{2}x^2. \quad (2)$$

as the Rayleigh potential, which represents a single-well (see Fig. 1 (a)). The potential has a minimum located at $x = 0$. In order to express Eq. (1) as a dynamical system and to analyze the fixed points, we set $\dot{x} = u$ and drop the forcing to obtain

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u, \\ \dot{u} &= \mu(1 - u^2)u - x. \end{aligned} \quad (3)$$

We can observe from Eq. (3) that the only fixed point is located at $(x = 0, u = 0)$. For the case when $A_1 = 0$, the Rayleigh oscillator satisfies the Rayleigh-Liénard theorem, giving a limit cycle in the phase space, around the origin.

On the other hand, the Duffing oscillator is a nonlinear dynamical system governed by

$$\ddot{y} + \alpha\dot{y} + \frac{dU_2}{dy} = A_2 \cos(\omega_2 t), \quad (4)$$



where

$$U_2(y) = -\frac{1}{2}y^2 + \frac{1}{4}\varepsilon y^4. \quad (5)$$

and α is positive and it denotes a dissipative parameter, ε is a positive constant that controls the nonlinearity of the system, and A_2 is the amplitude of the external forcing, being ω_2 its frequency. The potential in Eq. (5) represents a double-well shown in Fig. 1 (b). The local minima of this potential are located in $y = \pm \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$ and the local maximum is located at $y = 0$. As a dynamical system the Duffing equation in (4) (no forcing) can be cast as

$$\begin{aligned} \dot{y} &= v, \\ \dot{v} &= -\alpha v + y - \varepsilon y^3, \end{aligned} \quad (6)$$

where we set $\dot{y} = v$. The fixed points for this system are located in the phase space at $(y = 0, v = 0)$ and $(y = \pm \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}, v = 0)$. The first one at $(y = 0, v = 0)$ is a saddle point, while the others, depending on the parameter α , they can be stable or unstable points. For $\alpha > 0$ the points result stables, for the $\alpha = 0$ case, the resulting dynamics is of type center and for $\alpha < 0$ case, the points result unstable. In particular, when the damping is positive ($\alpha > 0$), the trajectory of the system is spiral stable, conversely, for a damping negative ($\alpha < 0$), the trajectory is spiral unstable at the fixed points $(y = \pm \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}, v = 0)$ in both cases.

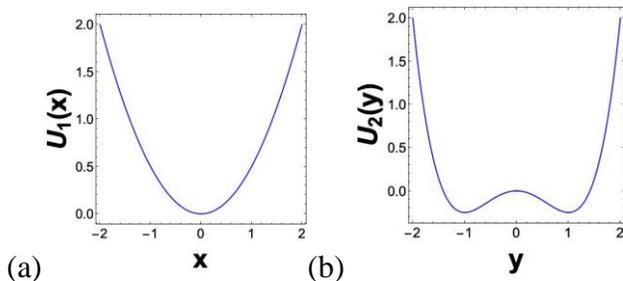


Figure 1. The potentials $U_1(x)$ and $U_2(y)$. (a) The potential corresponds to the Rayleigh oscillator. (b) The Duffing oscillator ($\varepsilon = 1$).

3. Master-slave synchronization

In this section, two different couplings for the Rayleigh and Duffing systems are studied and compared among themselves, namely: the dissipative and the one that combines elastic and dissipative couplings employed by *Uriostegui et. al* [34]. Let us stress that most of the research on synchronization is based on autonomous systems of three-dimensional or higher [38,39,40]. Three of the most studied nonautonomous systems of low-dimensional with forcing are the Duffing, van der Pol, Rayleigh and their variations, since much of the dynamical features embedded in the physical systems can be realized on these systems [41,42,43]. One important implication is that a two-dimensional continuous dynamical system cannot give rise to strange attractors. In particular, chaotic behavior arises only in continuous three-dimensional dynamical systems or higher. Most of the research on synchronization is based on autonomous systems that satisfy the Poincaré-Bendixson theorem. Nevertheless, let us stress that the Rayleigh and Duffing oscillators being two-dimensional, need an external forcing to present chaos.

The dynamics for each oscillator under study is described by the equations in (1) and (4). The values of the parameters we use are as follows: $\mu=1.2$, $\alpha=0.3$, $\varepsilon=1$, $A_1=2.8$, $\omega_1=0.2$, $A_2=0.5$ and $\omega_2=1.3$. In Figs. 2 and 3 it is displayed the respective trajectories with the initial conditions $x(0) = 1$, $y(0) = 2$, $u(0) = 1$ and $v(0) = -1$. Let us mention that the very same values of the parameters and the initial conditions will be used in the subsequent numerical simulations. The numerical simulations were performed using the fourth order of the Runge–Kutta method.

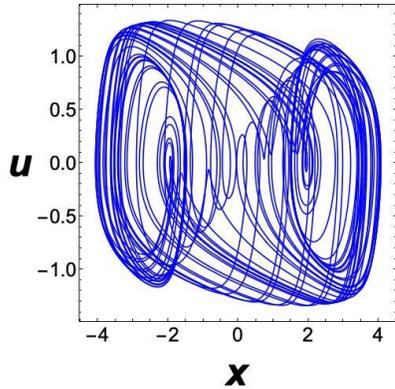


Figure 2. Rayleigh oscillator described by Eq. (1).

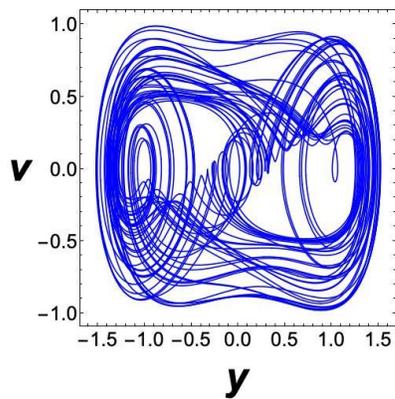


Figure 3. Duffing oscillator described by Eq. (4).

In the configuration master-slave, the Duffing oscillator acts as master and the Rayleigh oscillator as slave. For this case we have

$$Master: \begin{cases} \dot{y} = v, \\ \dot{v} = -\alpha v + y - \varepsilon y^3 + A_2 \cos(\omega_2 t), \end{cases} \quad (7)$$

$$Slave: \begin{cases} \dot{x} = u, \\ \dot{u} = \mu(1 - u^2)u - x + A_1 \cos(\omega_1 t) + H(v - u). \end{cases} \quad (8)$$

In this instance, the coupling used corresponds to a dissipative coupling and it is represented by $H(v - u)$, being H a coupling parameter to be varied. For the $H = 0$ case, the system decouples. The coupling is linear feedback to the slave oscillator and it can be seen as a perturbation for each oscillator in the system, proportional to the difference of the velocity, named in literature a dissipative coupling. We are interested in studying how the dynamics of the

system evolves as the constant coupling H changes.

In general, the synchronization problem reduces to finding a suitable value of the coupling strength H , (denoted by H^*) being in the range $H \geq H^* > 0$, such that the master and slave systems synchronize. Thus, for a coupling strength H^* , when the complete synchronization is reached, the error function goes to zero:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - x(t)| = \lim_{t \rightarrow \infty} |v(t) - u(t)| = 0. \quad (9)$$

When the system is in practical synchronization, for a certain value of H^* , the error functions satisfy

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - x(t)| \leq \delta, \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |v(t) - u(t)| \leq \tau, \quad (11)$$

for given positive values $\delta, \tau > 0$, and arbitrary initial conditions. This definition is used, because, sometimes, the errors do not exactly converge to zero, but in practice we can still speak of synchronized systems. In some cases, it can be reached complete synchronization in a single state of the system while in the other, it can be only obtained practical or null synchronization. Although, in practice, such as in analog circuits, we have no total control on the parameters used (e.g., resistors, capacitors, transistors), which makes not possible reproducing the required conditions in the numerical simulations. This could give no complete synchronization. The partial synchronization is the phenomenon when, in a dynamical system, only part of the state variables synchronizes and the others do not.

Let us consider the error functions $|y(t) - x(t)|$ and $|v(t) - u(t)|$ by taking H as a control parameter to be varied in small steps from 0 to 200. For our case, the error functions allow us to



find the range of values for H in which the synchronization is reached in the projections onto the (x, y) and (u, v) planes, as it can be shown in Figs. 4 and 5. Notice that in the projection onto the (x, y) plane no complete synchronization exists since the error function $|y(t) - x(t)|$ do not exactly converge to zero; the $|v(t) - u(t)|$ function goes to zero for large values of H . For the projection onto the (u, v) plane, the complete synchronization could be reached for rather large values of H . In order to see this, let us observe that the errors $e_1 = y - x$ and $e_2 = v - u$ can be calculated from Eqs. (7) and (8) as:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{y} - \dot{x} = e_2, \\ \dot{e}_2 &= \dot{v} - \dot{u} = -\alpha v + y - \epsilon y^3 + A_2 \cos(\omega_2 t) \\ &\quad - \mu(1 - u^2)u + x - A_1 \cos(\omega_1 t) - H(e_2). \end{aligned} \quad (12)$$

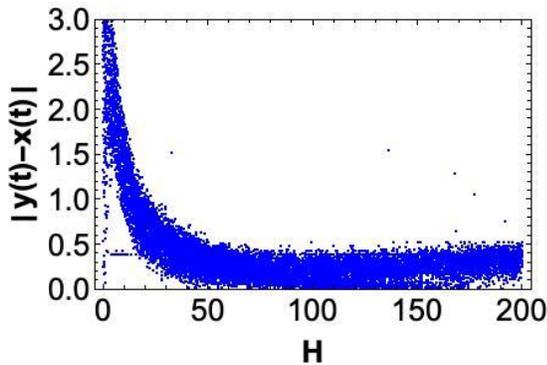


Figure 4. The error function $|y(t) - x(t)|$ varying the parameter H .

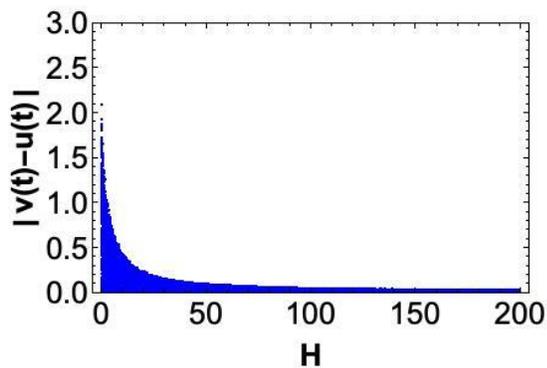


Figure 5. The error function $|v(t) - u(t)|$ varying the parameter H .

The plots of $|e_1|$ and $|e_2|$ as a function of t for a value of $H = 200$, are depicted in Fig. 6.

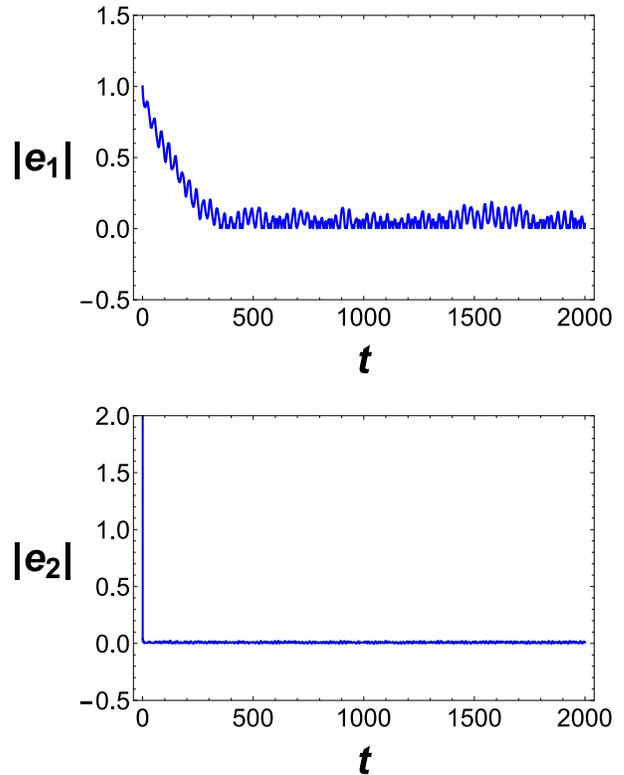


Figure 6. Error functions $|e_1|$ and $|e_2|$, for $H = 200$.

In Figure 7, it can be appreciated from a time-series plot of $x(t)$ and $y(t)$ that the signals are not in complete synchronization. On the contrary, in Figure 8 the time-series plot of $u(t)$ and $v(t)$, show that the signals are in complete synchronization.

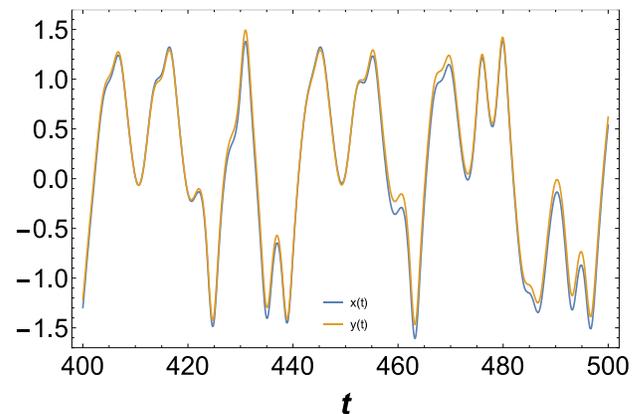


Figure 7. Time-series plot $x(t)$ and $y(t)$.

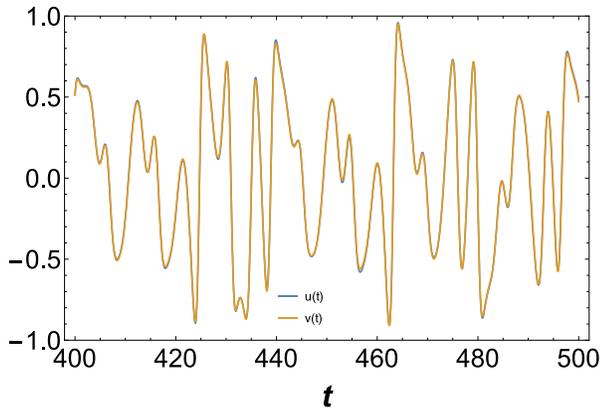


Figure 8. Time-series plot $u(t)$ and $v(t)$.

Let us analyze the projections onto the (x, y) and (u, v) planes for a specific value of $H = 200$. In this case the master system is in a chaotic regime. In Fig. 9 (a) it is shown the behavior of the Duffing oscillator (master) and in Fig. 9 (b) the Rayleigh oscillator (slave). In Fig. 9 (c) we can appreciate the fact that in the projection onto the (x, y) plane there is no complete synchronization while in the projection onto the (u, v) plane there is only complete synchronization (Fig. 9 (d)).

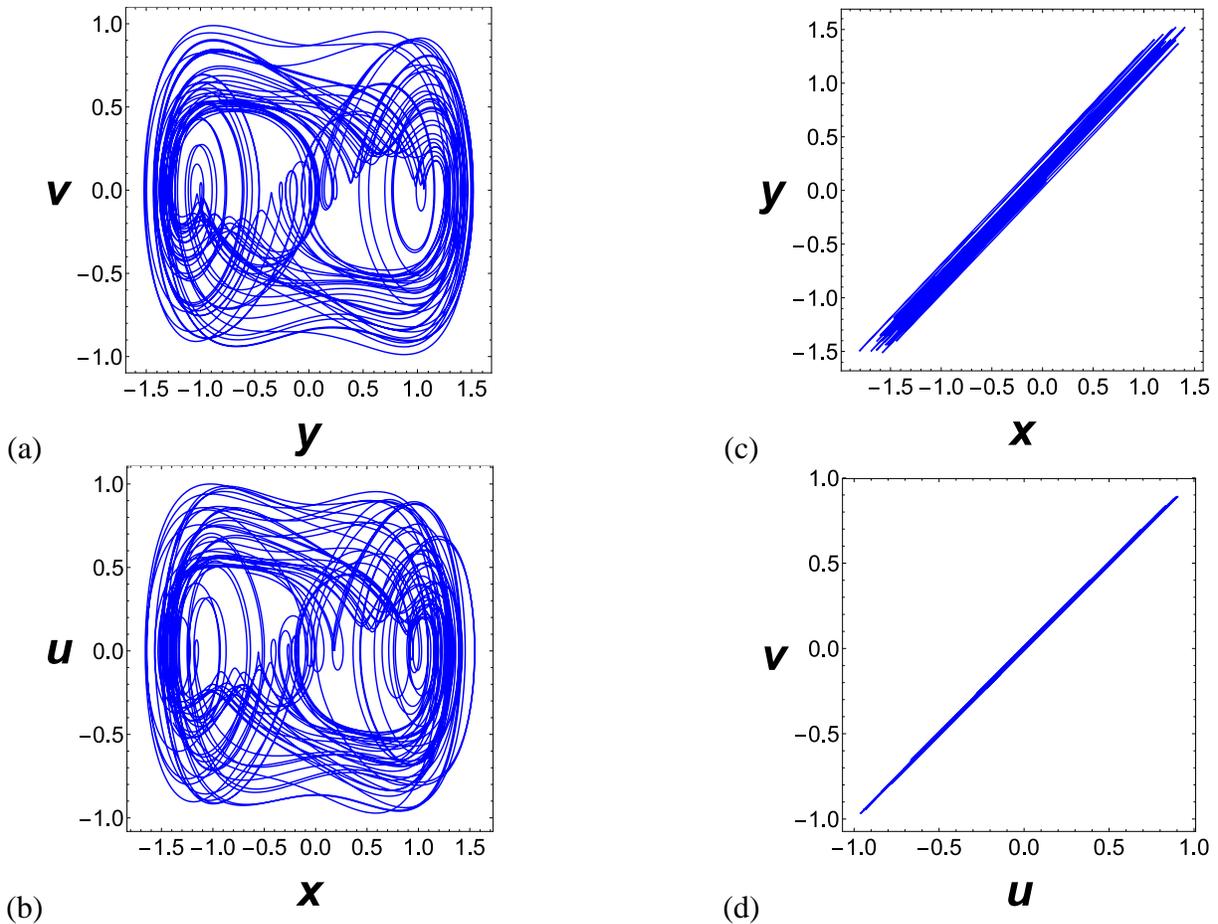


Figure 9. Dissipative coupling case, for $H = 200$. In (a) The Duffing oscillator (master) and in (b) the Rayleigh oscillator (slave). In (c) and (d) projections onto the (x, y) and (u, v) planes, respectively.



A modified master-slave scheme leading to synchronization even in the cases where the classical master-slave scheme fails, was considered in Ref. [34]. The system analyzed in this reference can be separated in two parts (see Eqs. (13) and (14)). On one side, the system combines a non-conventional coupling, where linear feedback is made. The elastic coupling is proportional to the difference of the position, $G_1(y - x)$, which is introduced in the velocity of the slave system. The other part uses also another linear feedback proportional to the difference of the velocity (dissipative coupling), $G_2(v - u)$, introduced in the acceleration in the slave system. For the Rayleigh and Duffing oscillators, the equations that govern the evolution are

$$\text{Master: } \begin{cases} \dot{y} = v, \\ \dot{v} = -\alpha v + y - \varepsilon y^3 + A_2 \cos(\omega_2 t), \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{Slave: } \begin{cases} \dot{x} = u + G_1(y - x), \\ \dot{u} = \mu(1 - u^2)u - x + A_1 \cos(\omega_1 t) + G_2(v - u). \end{cases} \quad (14)$$

The errors $e_3 = y - x$ and $e_4 = v - u$, are determined by subtracting Eqs. (13) and (14), given

$$\dot{e}_3 = \dot{y} - \dot{x} = v - u - G_1 e_3,$$

$$e_4 = v - u = \dot{e}_3 + G_1 e_3,$$

$$\dot{e}_4 = \dot{v} - \dot{u} = -\alpha v + y - \varepsilon y^3 + A_2 \cos(\omega_2 t)$$

$$- \mu(1 - u^2)u + x - A_1 \cos(\omega_1 t) - G_2(e_4). \quad (15)$$

The constant G_1 corresponds to the elastic coupling and G_2 to the dissipative coupling. Hence, $G_1(y - x) = G_1(e_3)$ and $G_2(v - u) = G_2(\dot{e}_3 + G_1 e_3)$ which manifest the dependence of G_2 on the derivative of error and the coupling G_1 , giving more information about the dynamical evolution of the system. Let us introduce the vector

$$\begin{pmatrix} G_1(y - x) \\ G_2(v - u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_1 e_3 \\ G_2 \dot{e}_3 + G_2 G_1 e_3 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

which is called control vector, and it contains the coupling we propose. Notice that the control depends on the error and its derivative. As before, for the case $G_1 = G_2 = 0$, the system decouples. In order to study the dynamics of the system, we vary the couplings G_1 and G_2 keeping one of them constant, while the other is varied. Let us consider the $|y(t) - x(t)|$ and $|v(t) - u(t)|$ error functions. We calculate $|y(t) - x(t)|$ keeping $G_2 = 100$ and varying G_1 in small steps from 0 to 10. In a similar way, we obtain the error function $|v(t) - u(t)|$ with $G_1 = 5$ and varying G_2 in small steps from 0 to 200. As it can be appreciated from Figs. 10 and 11, we obtain complete synchronization, since the error functions go to zero as the value of G_1 and G_2 are increased. The plots of $|e_3|$ and $|e_4|$ as a function of t , for the values of $G_1 = 5$ and $G_2 = 100$, are depicted in Fig. 12.

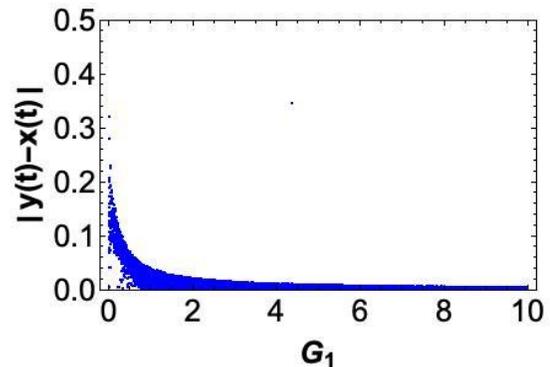


Figure 10. The error function $|y(t) - x(t)|$ varying the parameter G_1 .

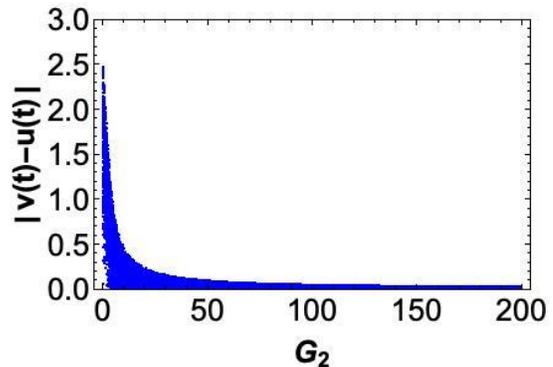


Figure 11. The error function $|v(t) - u(t)|$ varying the parameter G_2 .

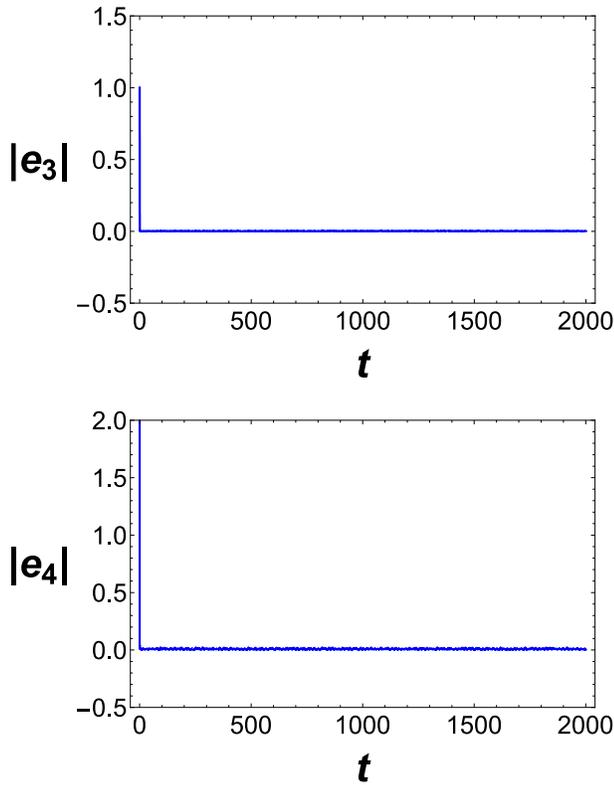


Figure 12. Error functions $|e_3|$ and $|e_4|$ with respective values of $G_1 = 5$ and $G_2 = 100$.

As it can be observed in Figs. 13 and 14, the time-series plots of $x(t)$, $y(t)$, $u(t)$, and $v(t)$ shown that the signals are in complete synchronization.

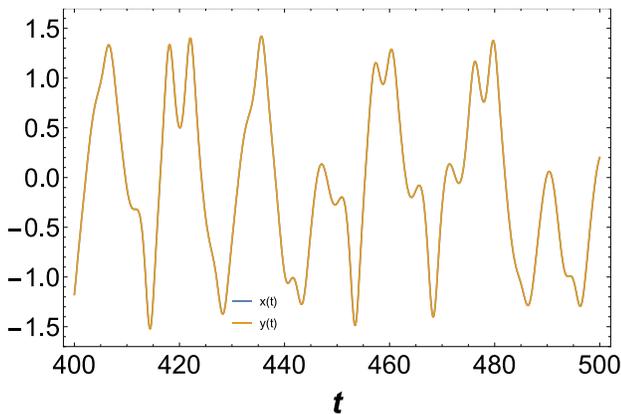


Figure 13. Time-series plot $x(t)$ and $y(t)$.

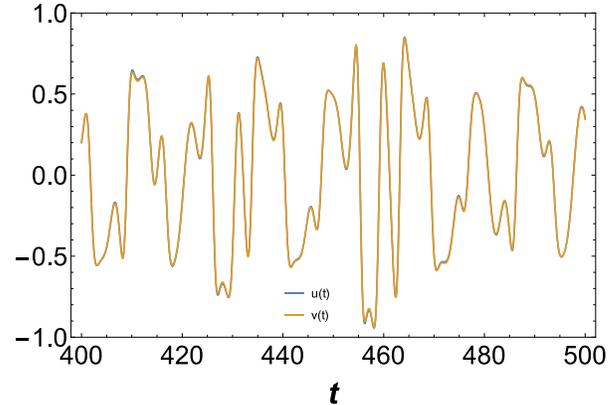


Figure 14. Time-series plot $u(t)$ and $v(t)$.

Let us now analyze the projections onto the (x, y) and (u, v) planes for values of $G_1 = 5$ and $G_2 = 100$. For this case, the Duffing oscillator is in a chaotic regime; the Rayleigh oscillator is maintained as the slave system. In Figs. 15 (a) and (b) the behavior of the Duffing and Rayleigh oscillators is shown, respectively, while in (c) and (d), it can be observed that complete synchronization is reached for these systems.

For certain systems, it is not possible to reach synchronization when the classical master-slave scheme is used. In some cases, the systems reach complete synchronization in a single state of the slave system as it occurs for the dynamics contained in Eqs. (7) and (8), depending on H , obtaining partial synchronization by using dissipative coupling for Rayleigh and duffing oscillators. Variations to the master-slave scheme for some systems have been proposed to solve certain kind of problems [44-47]. In particular, in Ref. [34] a modified master-slave scheme is considered that leads to synchronization even in the cases where the classical master-slave scheme fails.

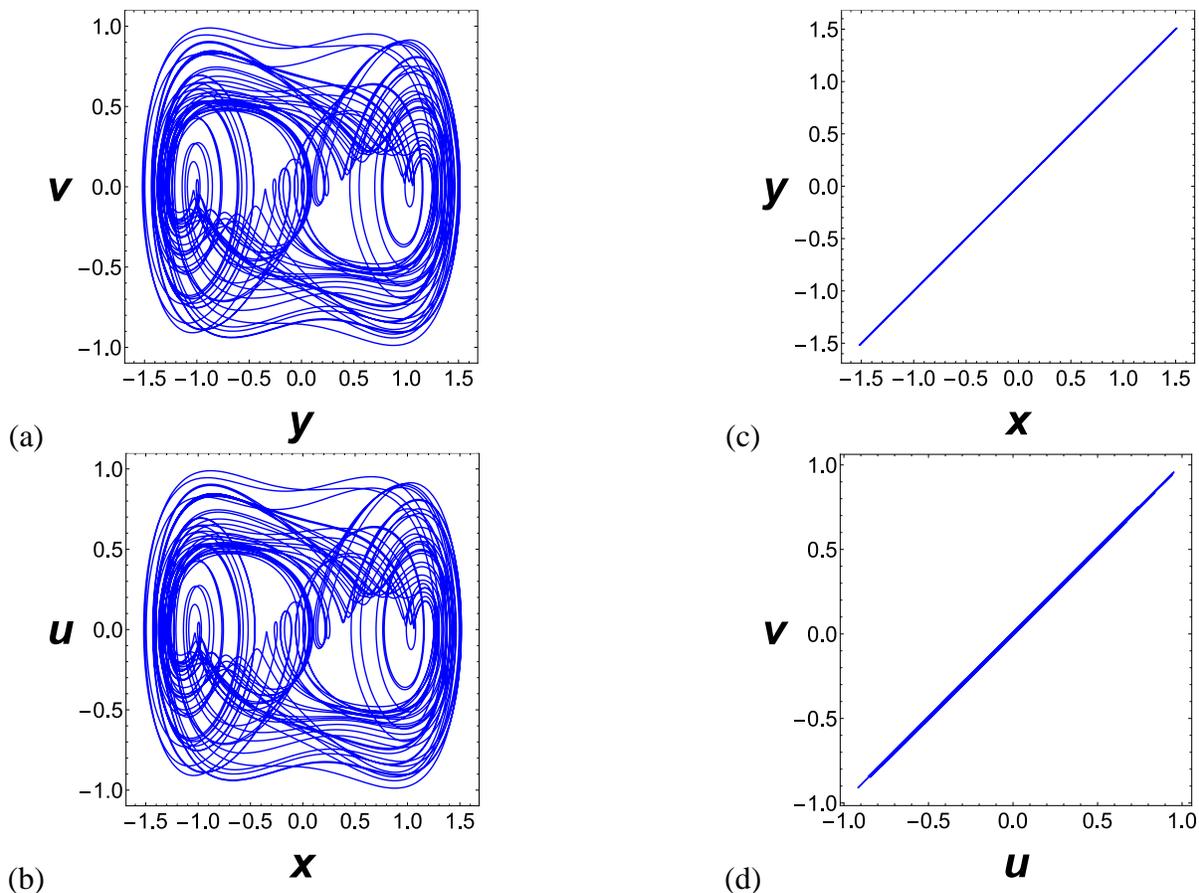


Figure 15. Elastic and dissipative couplings for $G_1 = 5$ and $G_2 = 100$. In (a) The Duffing oscillator (master) and in (b) the Rayleigh oscillator (slave). In (c) and (d) projections onto the (x, y) and (u, v) planes respectively.

4. Conclusions

The Rayleigh and Duffing are low-dimensional nonautonomous systems that present chaos and have been well studied. In this work, we have studied the master-slave configuration in the Rayleigh and Duffing oscillators, when dissipative coupling is used, only complete synchronization in the projection onto the (u, v) plane can be reached. As a matter of fact, according to the classical master-slave coupling, in the best of cases, it is obtained only complete synchronization in a single state of the slave system studied. On the other hand, the possibility of using two coupling (elastic and dissipative, in this case), blending up as one, allows the system

a more interesting dynamics and a broad range for the control parameters. In this paper, we have analyzed the synchronization in the Rayleigh and Duffing oscillators using the combination of the elastic and dissipative couplings. We observed that, in a difference with other approaches, with this new coupling, we were able of obtaining complete synchronization in the projections onto the (x, y) and (u, v) planes. In order to apply synchronization in communication systems, it is necessary to have a large range of the control parameter, which is obtained in the Rayleigh and Duffing oscillators, by employing our approach of coupling. This kind of coupling will be applied in others systems that do not present synchronization through the usual methods.



5. Acknowledgements

This work has been partially supported by UMNSH. U. Uriostegui-Legorreta thanks to CONACYT for financial support.

6. Authorship acknowledgements

Ulises Uriostegui Legorreta: Conceptualización; Recursos; Ideas; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Borrador original; Administración de proyecto. *Eduardo Salvador Tututi Hernández:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Análisis formal; Análisis de datos; Escritura; Revisión y edición.

References

- [1] L.M. Pecora and T.L. Carroll, *Synchronization in chaotic systems*, Phys. Rev. Lett. 64, (1990) 821.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.64.821>
- [2] I. Pastor-Diaz and A. López-Fraguas, *Dynamics of two coupled van der Pol oscillators*, Phys. Rev. E 52, (1995) 1480.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.52.1480>
- [3] C. Reick and E. Mosekilde, *Emergence of quasiperiodicity in symmetrically coupled, identical period-doubling systems*, Phys. Rev. E 52, (1995) 1418.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.52.1418>
- [4] M. Z. Ding and W. H. Yang, and H. J. Zhang, *Observation of intermingled basins in coupled oscillators exhibiting synchronized chaos*, Phys. Rev. E 54, (1995) 2489.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.54.2489>
- [5] H-W. Yin and J-H. Dai, *Phase effect of two coupled periodically driven Duffing oscillators*, Phys. Rev. E 58, (1998) 5683.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.5683>
- [6] K-J. Lee, Y. Kwak and T-K. Lim, *Phase jumps near a phase synchronization transition in systems of two coupled chaotic oscillators*, Phys. Rev. Lett. 81, (1998) 321.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.321>

- [7] L.O. Chua, M. Itoh, L. Kocarev and K. Eckert, *Chaos synchronization in Chua circuit*, J. Circuits, Systems and Computers 3, (1993) 93.
<https://doi.org/10.1142/S0218126693000071>
- [8] E.D. Dongmo, K.S. Ojo, P. Wofo and A.N. Njah, *Difference Synchronization of Identical and Nonidentical Chaotic and Hyperchaotic Systems of Different Orders Using Active Backstepping Design*, ASME. J. Comput. Nonlinear Dynam. 13, (2018) 051005.
<https://doi.org/10.1115/1.4039626>
- [9] D. López-Mancilla, G. López-Cahuich, C. Posadas-Castillo, C.E. Castañeda, J.H. García-López, J.L. Vázquez-Gutiérrez and E. Tlelo-Cuautle, *Synchronization of complex networks of identical and nonidentical chaotic systems via model-matching control*, PLoS ONE, 14, (2019) 0216349.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216349>
- [10] C. Huang and J. Cao, *Active control strategy for synchronization and anti-synchronization of a fractional chaotic financial system*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 473, (2017) 262.
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.01.009>
- [11] Q. Ye, Z. Jiang and T. Chen, *Adaptive Feedback Control for Synchronization of Chaotic Neural Systems with Parameter Mismatches*, Complexity, Vol. 2018, (2018) 5431987. <https://doi.org/10.1155/2018/5431987>
- [12] J.A. Chekan, M.A. Nojournian, K. Merat and H. Salarieh, *Chaos control in lateral oscillations of spinning disk via linear optimal control of discrete systems*, J. Vib. Control, 23, (2017) 103.
<https://doi.org/10.1177/1077546315575248>
- [13] M.C. Pai, *Sliding Mode Control for Discrete-Time Chaotic Systems with Input Nonlinearity*, ASME: J. Dyn. Sys. Meas. Control, 142, (2020) 101003.
<https://doi.org/10.1115/1.4047218>
- [14] J. Yan and C. Li, *Generalized projective synchronization of a unified chaotic system*,



Chaos, Solitons and Fractals, 26, (2005) 1119.

<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2005.02.034>

[15] A.Razminia and B.Dumitru, *Complete synchronization of commensurate fractional order chaotic systems using sliding mode control*, Mechatronics, 23, (2013) 873.

<https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.02.004>

[16] A. Ouannas, A.T. Azar and S. Vaidyanathan, *New hybrid synchronization schemes based on coexistence of various types of synchronization between master-slave hyperchaotic systems*, Int. J. Comput. Appl. Technol, 55, (2017) 112.

<https://doi.org/10.1504/IJCAT.2017.10003542>

[17] E. Campos, J. Urias and N.F. Rulkov, *Multimodal synchronization of chaos*, Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 14, (2004) 48-54.

<https://doi.org/10.1063/1.1624651>

[18] J.S. González Salas, E. Campos Cantón, F.C. Ordaz Salazar and I. Campos Cantón, *Forced synchronization of a self-sustained chaotic oscillator*, Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 18, (2008) 023136.

<https://doi.org/10.1063/1.2947661>

[19] A. Anzo-Hernández, E. Campos-Cantón and M. Nicol, *Itinerary synchronization between PWL systems coupled with unidirectional links*, Commun Nonlinear Sci NumerSimulat, 70, (2019) 102.

<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2018.10.020>

[20] A. Khan and Shikha, *Hybrid function projective synchronization of chaotic systems via adaptive control*, Int. J. Dynam. Control, 5, (2017) 1114.

<https://doi.org/10.1007/s40435-016-0258-6>

[21] A.Karimov, A.Tutueva, T.Karimov, O.Druzhina and D.Butusov, *Adaptive Generalized Synchronization between Circuit and Computer Implementations of the Rössler System*, Appl. Sci. 2021, 11, 81.

<https://doi.org/10.3390/app11010081>

[22] K. Murali and M. Lakshmanan, *Transmission of signals by synchronization in a chaotic Van der Pol–Duffing oscillator*, Phys. Rev. E 48, (1993) R1624.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.48.R1624>

[23] A.N. Njah, *Synchronization via active control of parametrically and externally excited Φ^6 Van der Pol and Duffing oscillators and application to secure communications*, Journal of Vibration and Control 17, (2010) 504.

<https://doi.org/10.1177/1077546309357024>

[24] L. Lu, F. Zhang and C. Han, *Synchronization transmission of the target signal in the circuit network based on coupling technique*, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 535, (2019) 122412.

<https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.122412>

[25] M.S. Dutra, A.C. de Pina Filho and V.F. Romano, *Modeling of a bipedal locomotor using coupled nonlinear oscillators of Van der Pol*, Biol. Cybern 88, (2003) 292.

<https://doi.org/10.1007/s00422-002-0380-8>

[26] R.F. Jasni and A.A. Shafie, *Van Der Pol Central Pattern Generator (VDP-CPG) Model for Quadruped Robot*, IRAM 2012. Communications in Computer and Information Science 330, (2012) 175.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-35197-6_18

[27] S. Mall and S. Chakraverty, *Hermite Functional Link Neural Network for Solving the Van der Pol–Duffing Oscillator Equation*, Neural Computation 28, (2016) 1598.

https://doi.org/10.1162/NECO_a_00858

[28] S.C. Sarkhosh, S.C. Shahriar and P.P. See, *Application of Chebyshev neural network to solve Van der Pol equations*, International Journal of Basic and Applied Sciences 10, (2021) 19. <https://doi.org/10.14419/ijbas.v10i1.31431>

[29] J.C. Chedjou, K. Kyamakya, I. Moussa, H.P. Kuchenbecker, W. Mathis, *Behavior of a self-sustained electromechanical transducer and routes to chaos*, J. Vib. Acoust. 128, (2006) 282.

<https://doi.org/10.1115/1.2172255>



- [30] J.C. Chedjou, H.B. Fotsin, P. Wofo, and S. Domngang, *Analog simulation of the dynamics of a van der Pol oscillator coupled to a Duffing oscillator*, IEEE Trans. Circuits Syst.I, Fundam. Theory Appl. 48, (2001) 748. <https://doi.org/10.1109/81.9281575>
- [31] A.P. Kuznetsov, N.V. Stankevich, L.V. Turukina, *Coupled van der Pol-Duffing oscillators: phase dynamics and structure of synchronization tongues*, Physica D 238, (2009) 1203. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2009.04.001>
- [32] M.S. Siewe, S.B. Yamgoué, E.M. MoukamKakmeni, C. Tchawoua, *Chaos controlling self-sustained electromechanical seismograph system based on the Melnikov theory*, Nonlinear Dyn. 62, (2010) 379. <https://doi.org/10.1007/s11071-010-9725-3>
- [33] U.E. Vincent and A. Kenfack, *Synchronization and bifurcation structures in coupled periodically forced non-identical Duffing oscillator*, Phys. Scr. 77, (2008) 045005. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/77/04/045005>
- [34] U. Uriostegui, E.S. Tututi and G. Arroyo, *A new scheme of coupling and synchronizing low-dimensional dynamical systems*, Rev. Mex. Fis. 67, (2021) 334. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.67.334>
- [35] J. Kengne, J.C. Chedjou, G. Kenne, K. Kyamakya and G.H. Kom, *Analog circuit implementation and synchronization of a system consisting of a van der Pol oscillator linearly coupled to a Duffing oscillator*, Nonlinear Dyn, 70, (2012) 2163. <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0607-8>
- [36] J. Kengne, F. Kenmogne and V. Kamdoum Tamba, *Experiment on bifurcation and chaos in coupled anisochronous self-excited systems: Case of two coupled van der Pol-Duffing oscillators*, Journal of Nonlinear Dynamics, 2014, (2014) 815783. <https://doi.org/10.1155/2014/815783>
- [37] U. Uriostegui and E.S. Tututi, *Synchronization in the van der Pol-Duffing system via elastic and dissipative couplings*, Rev. Mex. Fis. 68, (2022) 011402, pp.1–13. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.68.011402>
- [38] H. Zhang, D. Liu and Z. Wang, *Controlling Chaos: Suppression, Synchronization and Chaotification*, Springer, London, (2009). <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-523-9>
- [39] S. Boccaletti, J. Kurths, G. Osipov, DL. Valladares and CS. Zhou, *The synchronization of chaotic systems*, Physics Reports 366, (2002) 101. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(02\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(02)00137-0)
- [40] L. M. Pecora and T. L. Carroll, *Synchronization of chaotic systems*, Chaos, 25, (2015) 097611. <https://doi.org/10.1063/1.4917383>
- [41] T-P Chang, *Chaotic motion in forced duffing system subject to linear and nonlinear damping*, Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2017, (2017) 3769870. <https://doi.org/10.1155/2017/3769870>
- [42] M.S. Siewe, C. Tchawoua, and P. Wofo, *Melnikov chaos in a periodically driven Rayleigh-Duffing oscillator*, Mechanics Research Communications, Vol. 37, (2010) 363. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2010.04.001>
- [43] Y-Z. Wang, and F-M. Li, *Dynamical properties of Duffing-van der Pol oscillator subject to both external and parametric excitations with time delayed feedback control*, Journal of Vibration and Control, Vol. 21, (2015) 371. <https://doi.org/10.1177/1077546313483160>
- [44] K. Ding, *Master-Slave Synchronization of Chaotic Φ^6 Duffing Oscillators by Linear State Error Feedback Control*, Complexity Vol. 2019, (2019) 3637902. <https://doi.org/10.1155/2019/3637902>
- [45] A. Buscarino, L. Fortuna, and L. Patane, *Master-slave synchronization of hyperchaotic systems through a linear dynamic coupling*, Phys. Rev. E 100, (2019) 032215.



<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.032215>

[46] F. Aydogmus and E. Tosyali, *Master–slave synchronization in a 4D dissipative nonlinear fermionic system*, International Journal of Control Vol. 2020, (2020) 1.

<https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1808244>

[47] J.P. Ramirez, E. Garcia and J. Alvarez, *Master-slave synchronization via dynamic control*, Common Nonlinear Sci NumerSimulat, Vol. 80, (2020) 104977.

<https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.104977>

Copyright (c) 2022 Ulises Uriostegui-Legorreta, Eduardo Salvador Tututi-Hernández



This text is protected by a license [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

You are free to share — copy and redistribute the material in any medium or format — and adapt the document — remix, transform, and build on the material — for any purpose, including commercial purposes, provided that you:

Attribution: You must properly credit the original work, provide a link to the license, and indicate if changes have been made. You may do so in any reasonable way, but not in any way that suggests that you endorse or receive any endorsement from licensor for your use of the work.

[License Summary - Full License Text](#)



Indicadores críticos en el desempeño de actividades de cambios rápidos en la industria maquiladora de Baja California

Critical indicators in the performance of rapid change activities in the maquiladora industry in Baja California

Yuridia Vega ¹, Roberto Romero López ², Manuel Javier Rosel Solís ¹, Edgar Armando Chávez Moreno ¹, Oscar Adrián Morales Contreras ¹

¹Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd Universitario 1000, Unidad Valle de Las Palmas, 22260 Tijuana, Baja California, México

²Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Plutarco Elías Calles #1210 Fovissste Chamizal, C.P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Autor de correspondencia: Dra. Yuridia Vega, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd Universitario 1000, Unidad Valle de Las Palmas, 22260 Tijuana, Baja California, México. Email: vegay@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0001-5229-9655.

Recibido: 22 de septiembre del 2021

Aceptado: 08 de febrero del 2022

Publicado: 22 de febrero del 2022

Resumen. - *El cambio constante en los mercados, así como clientes más exigentes en los temas de calidad, las variaciones de productos y tiempos de entrega, ha inducido que las organizaciones tengan que generar innovaciones tecnológicas de tipo radical y/o incremental en sus productos o sistemas de fabricación, esto a través de la mejora de sus procesos administrativos y de tecnologías que favorezcan la eficiencia y flexibilidad de los procesos productivos. En este sentido, una de las problemáticas más investigadas por las empresas de manufactura son los cambios de modelo, que, a pesar de la implementación de metodologías de manufactura de clase mundial, aún queda un área de oportunidad en la mejora continua de reducir los tiempos de cambio, los cuales benefician la productividad, eficiencia, flexibilidad y calidad de la compañía, por lo que en este artículo se estudian una serie de indicadores críticos diferenciados en factores administrativos y técnicos evaluados en la industria maquiladora de Tijuana, Baja California, a través de la aplicación de un instrumento de medición validado por expertos y por el coeficiente de fiabilidad de alfa de Cronbach de 0.974, a una muestra de 337 individuos que tienen relación directa en los procesos de cambios, quedando de manifiesto la necesidad de controlar variables en el área técnica del sistemas de fabricación y relacionadas con el diseño de los productos, que al ser consideradas permite generar acciones de mejoras más eficientes.*

Palabras clave: Mejora continua; Cambio de modelos; Factores críticos.

Abstract. - *The constant change in the markets, as well as more demanding clients in terms of quality, product variations, and delivery times, has led organizations to generate radical and/or incremental technological innovations in their products or systems. of manufacturing, this through the improvement of its administrative processes and technologies that favor the efficiency and flexibility of the productive processes. In this sense, one of the most investigated problems by manufacturing companies is model changes, which, despite the implementation of world-class manufacturing methodologies, there is still an area of opportunity in continuous improvement to reduce lead times. of change, which benefits the productivity, efficiency, flexibility, and quality of the company, which is why in this article a series of critical indicators differentiated in administrative and technical factors evaluated in the maquiladora industry of Tijuana, Baja California, are studied through the application of a measurement instrument validated by experts and by the reliability coefficient of Cronbach's alpha of 0.974, to a sample of 337 individuals who are directly related to the processes of change, revealing the need to control variables in the technical area of the manufacturing systems and related to the design of the products, which when considered allows generating more efficient improvement actions.*

Keywords: Continuous improvement; Change of models; Critical factors.



1.- Introducción

Uno de las grandes retos de las organizaciones que están inmersas en la globalización, es la heterogeneidad de productos y tiempos de entrega más cortos [1], por lo que es vital para una compañía contar con procesos flexibles que les permita cambios de productos de una manera más eficiente en lo que a calidad, productividad y costos se refiere [2],[3].

Esta flexibilidad se puede dar de diferentes formas, entre las clasificaciones que se encuentran en la literatura destacan: ofrecer variedad de productos en el mercado, flexibilidad para adaptar la producción a distintos volúmenes, flexibilidad tecnológica en los procesos de fabricación, flexibilidad para usar equipos y/o piezas para futuras innovaciones de productos, flexibilidad externa de acuerdo a las necesidades de los clientes y uso de equipos y tecnologías, flexibilidad interna en las configuraciones de los sistemas y la flexibilidad del despliegue del personal [1]. Se han identificaron indicadores para medir la flexibilidad y la capacidad de cambio, un ejemplo es la revisión de literatura de 82 publicaciones del periodo de 1982 al 2018 donde se encontrando 13 indicadores claves [4].

En la Figura 1 se muestran los 13 indicadores, así como el número de veces que aparecieron en la literatura consultada, entre los que sobresalen con mayor repetitividad es la capacidad de adaptación al cambio, la versatilidad en el proceso, la variedad de producto que pueden ofrecer en el mercado y el cambio de configuración de productos en el proceso de producción.

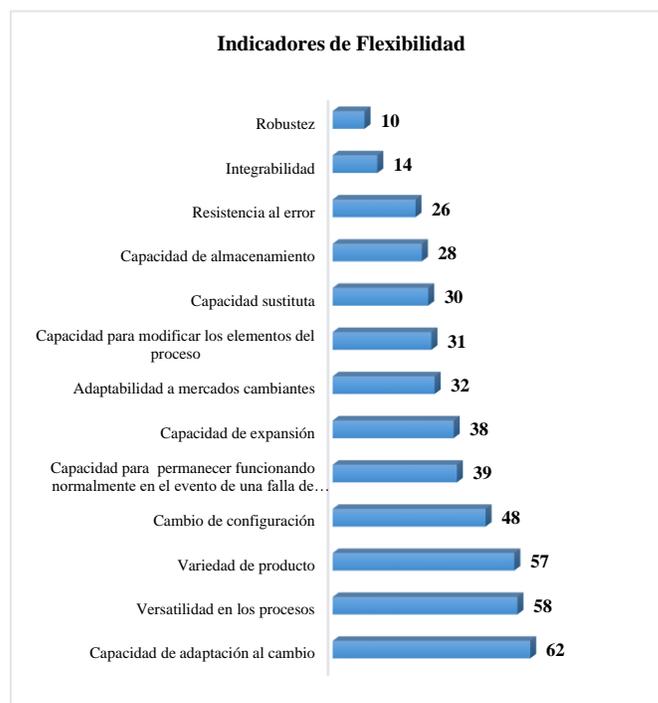


Figura 1. Indicadores de flexibilidad. Fuente: Elaboración propia a partir de [4].

Cuando hablamos de “cambios” en una organización es sinónimo de estrategias, las cuales se definen en cuatro dimensiones: costo, calidad, flexibilidad y fiabilidad [5], a través de la aplicación de tecnologías actualizadas y el empleo de personal capacitado.

Se distinguen dos maneras de cambio, el *cambio incremental*, que es aquel donde se realizan mejoras en los procesos existentes o en alguna de las etapas del ciclo de vida del producto para incrementar algún tipo de capacidad o generar un pequeño impacto en el mercado; y el *cambio radical*, que es un tipo de cambio más revolucionario en el cual se cambia por completo el proceso existente o el producto para impactar con mayor potencia al mercado [6], este tipo de cambio genera alta incertidumbre, debido a que moviliza a los sectores de negocios y la competitividad empresarial [7], [8].



Para favorecer los tiempos de configuración, se presenta un modelo de cambios rápidos que considera dos dimensiones, una la de organización, donde entran factores administrativos referentes al recurso humano (Personas) y a los métodos de trabajo (Práctica) y la segunda la de diseño que asocia factores técnicos del Producto y el Proceso o equipo de fabricación, y se le conoce como modelo de las 4Ps [9], el cual se muestra en la Figura 2, al ser controlados estos factores contribuye a la capacidad y flexibilidad de los procesos de fabricación, traduciéndose en competitividad en el mercado.

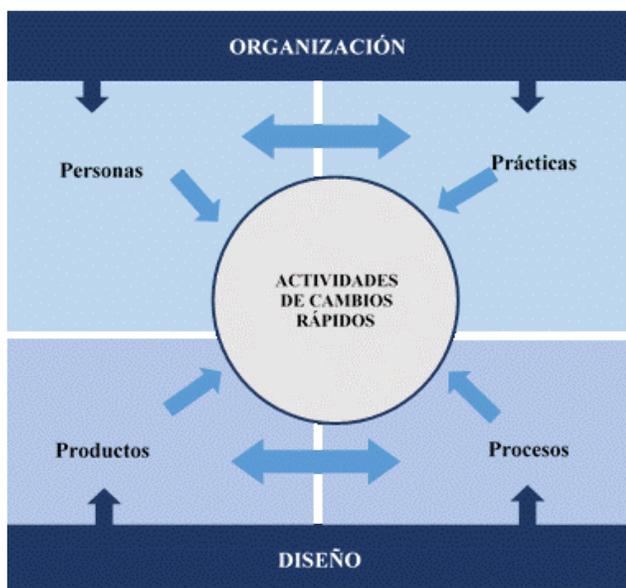


Figura 2. Las “4Ps” de cambios rápidos. Fuente:[9].

Este modelo muestra relaciones de causalidad o influencia positiva de las 4Ps sobre las actividades de cambios rápidos, así como correlaciones entre los factores (cada una de las Ps), para la resolución de la problemática de implementaciones efectivas de metodologías de actividades de cambios rápidos, pero los factores “P” por si solos no explican estos conceptos, por lo que se requieren variables observables medibles que expliquen a cada una de las Ps del modelo.

En la Tabla 1, se muestran 59 variables observables, identificadas a través de una investigación realizada por Vega et al. y validadas por juicio de expertos y análisis estadísticos de fiabilidad a través del diseño de un instrumento de medición de cambios rápidos [10].

Los resultados obtenidos en la validación de juicio de expertos, al probar la hipótesis de concordancia W de Kendall, dio un valor p de 0.029, indicando que existe concordancia significativa en las puntuaciones dadas por los jueces [11]. Asimismo, se utilizó el índice de alfa de Cronbach para comprobar la fiabilidad y confiabilidad del instrumento, cuanto más cercano es el coeficiente a 1, más confiable es el instrumento[12], el valor obtenido fue de 0.974, considerándose estadísticamente un instrumento válido y fiable para mediar las variables del modelo 4Ps.

En este trabajo se presentan las variables que resultaron críticas después de aplicar el instrumento de medición de cambios rápidos de Vega et al. a 337 encuestados de la industria maquiladora de Tijuana Baja California, cabe mencionar que estos resultados se obtienen a través de estadística descriptiva y orientan a las empresas a dirigir los esfuerzos de mejora continua en sus tiempos de cambios de modelos.

En los siguientes apartados se muestra la metodología seguida, resultados y conclusiones de la investigación, siendo esto solo una parte de los resultados de la validación del modelo de las 4Ps.



Tabla 1. Desglose de las 59 variables en el modelo teórico de las 4Ps. *Fuente: Elaboración propia.*

	Variables del Factor Persona	Variables del Factor Práctica		
DIMENSIÓN ORGANIZACIONAL	<ul style="list-style-type: none"> *Habilidades de las personas *Cultura *Capacitación/entrenamiento *Compromiso *Especialización *Calidad de las tareas *Trabajo en equipo (motivación, comunicación, liderazgo) *Responsables de proyectos de mejora *Número de operadores 	<ul style="list-style-type: none"> *Estructura organizacional *Procedimientos Documentados *Supervisión *Seguimiento de procedimientos *Secuencia de trabajo *Empleo de herramientas de mejora continua *Condiciones ambientales *Objetivos de la compañía *Seguridad *Equilibrio de la carga de trabajo 		
	Variables del Factor Producto	Variables del Factor Proceso		
DIMENSIÓN DE DISEÑO	<ul style="list-style-type: none"> *Documentación del producto *Variedad de tamaños *Tamaño del lote *Especificaciones de calidad *Características estándar del producto *Configuraciones en el plan de producción. 	<ul style="list-style-type: none"> *Medición *Proceso manual *Automatización *Sistema de fijación modular *Herramientas del fabricante *Manipulación *Ubicación herramientas *Dispositivos de liberación rápida *Elementos de ajustes *Transporte de las herramientas *Limpieza *Accesos a la máquina herramientas *Peso ligero de materiales 	<ul style="list-style-type: none"> *Simplificación *Estandarización *Manejo *Dispositivos de Sujeción *Universalidad *Sistemas tolerantes a la variación *Equipo de monitoreo/ Detección de desperdicios *Sistemas a prueba y error *Líneas de máquina *Identificación de piezas (color, grabado) *Disminución del esfuerzo *Mantenimiento *Tareas dependientes 	

2.- Metodología

La metodología seguida en este trabajo consiste en 6 pasos que se presentan a en la Figura 3 y es una propuesta resumida de la investigación titulada “Impacto de los factores de las 4Ps en las actividades de cambios rápidos. Modelo predictor para la industria manufacturera de B.C.”[13].

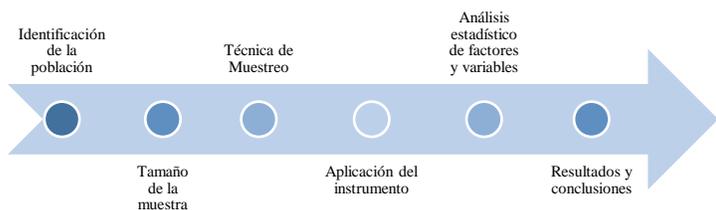


Figura 3. Metodología genérica para la investigación de identificación de factores críticos. *Fuente: Elaboración propia.*

2.1. Identificación de la población de estudio:

La población objetivo es la industria maquiladora de Baja California que implementan metodologías de cambios rápidos en sus procesos y aun requieren acortar los tiempos de cambios, para una mayor claridad se clasifíco por giro y tamaño de la empresa.

2.2. Tamaño de muestra a considerar:

para el tamaño de muestra se consideró el criterio de no menor a 100 entrevistados y como regla 4 o 5 veces el número de variables, regla utilizada para validaciones de modelos por ecuaciones estructurales [14], [15], ya que en publicaciones futuras se presentara la validación estadística del modelo completo de las 4Ps de cambios rápidos, además que una muestra de este tamaño presenta resultados más estables y que pueden ser replicados con otras muestras.

2.3. Técnica de muestreo:

La selección de la empresa se llevó a cabo por la técnica no



probabilística por conveniencia, la cual se fundamenta en la accesibilidad, facilidad y bajo costo para llegar al sujeto de estudio [16]–[18]. En este sentido, se seleccionó a las empresas manufactureras de Tijuana Baja California, que manejan procesos de fabricación con moldes y aplican de manera formal o aislada técnicas de cambios rápidos, así como también empresas con objetivos en el control de los tiempos de cambio y que permitieran evaluar el impacto de los factores organizacionales y de diseño en sus procesos

2.4. Aplicación del instrumento: El cuestionario fue aplicado de forma impresa y/o a través de la plataforma de formularios de *Google forms* según el caso.

2.5. Análisis estadístico de factores y variables:

a) Se realizó un análisis de varianza simple para identificar la diferencia entre los 4 factores, b) se analizaron los estadísticos de media aritmética, desviación estándar e intervalos de confianza y gráfica de cajas para identificar el factor P más bajo y de mayor variación, c) se identificaron las variables críticas en los factores resultantes en el inciso b con calificaciones más bajas. Cabe mencionar que se identifican las variables con valores menores a 4, debido a que el instrumento aplicado maneja la escala de Likert de 6 puntos, donde los sujetos califican; (6) totalmente de acuerdo, (5) muy de acuerdo, (4) de acuerdo, (3) en desacuerdo, (2) muy en desacuerdo y (1) Totalmente en desacuerdo. Además, que los enunciados del instrumento fueron redactados de manera positiva al indicador.

3. Resultados y Discusiones

A continuación, se presentan los principales resultados del estudio de factores críticos en la implantación de cambios rápidos en la industria maquiladora de Tijuana, Baja California.

3.1. Contexto de la industria de Baja California.

Baja California se caracteriza entre los estados con mayor industria manufacturera del país. En el año 2020 contaba con una población de 3,711,772 habitantes distribuidos en sus 5 municipios, de los cuales 409,433 son población económicamente activa en la industria maquiladora del estado, representando un 24% del total de 1,687,966 de personas ocupadas [19]. A nivel nacional ocupa el tercer lugar en estados de exportación de mercancías, solo en 2019 se reportó a la economía 32,229,572 miles de dólares de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [20]. Estos resultados, en gran medida, se deben a que es un estado con ventajas en el transporte ya que cuenta con cruces fronterizos a EUA en los municipios de Mexicali, Tijuana y Tecate; cuatro aeropuertos, de los cuales tres son internacionales (Mexicali, Tijuana y San Felipe), además de cinco puertos marítimos, siendo el de Ensenada el de mayor potencial para el comercio, dando acceso a empresas de EUA, Japón, China, Corea del Sur, entre otros [21]. Solo en el directorio de la Industria Maquiladora de Baja California, se tienen registradas 2,131 empresas, clasificadas en 23 tipos, siendo las de mayor impacto la industria automotriz, metalmecánica, electrónica, aceros y metales, médica, plásticos, moldes de inyección, entre otros [22].

Tijuana concentra el 73% de las industrias maquiladoras de exportación del Estado, de acuerdo con datos del monitor económico de Baja California [23], ocupando el cuarto lugar en monto de exportación a nivel nacional en 2018.



Cuenta con 457 empresas, distribuidas en 674 plantas industriales [24], siendo las de mayor volumen las empresas de plástico y moldeo, electrónicas, aceros y metales, muebles, automotriz, entre otras como se aprecia en la Figura 4.

Como se puede apreciar, a partir del análisis anterior, Tijuana es una excelente fuente de información para este proyecto, ya que cuenta con suficientes empresas para la generación de datos.

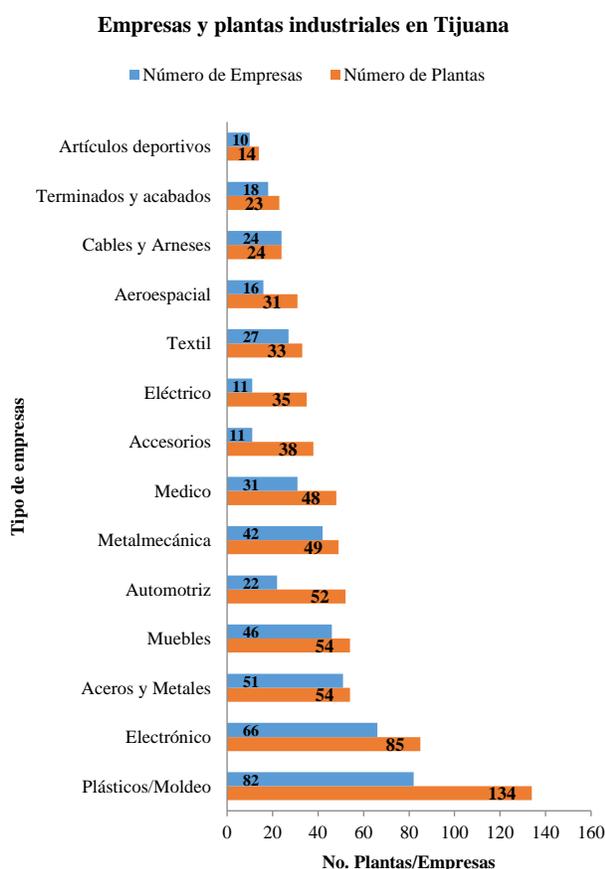


Figura 4. Clasificación de las industrias maquiladoras en Tijuana Baja California. Fuente: Elaboración propia a partir de [24]

3.2 Resultados de la aplicación del instrumento de cambios rápidos

El instrumento se aplicó a sujetos que tuvieron relación con las actividades de cambios rápidos, entre los involucrados se encuentran: operadores, técnicos, ingenieros, supervisores y gerentes. Se aplicaron 373 instrumentos, descartando a 36 de ellos debido a que superaba el 5% de ítems sin contestar, o bien no presentaban variabilidad en las respuestas, quedando con un total de 337 casos para el análisis que de acuerdo con el tamaño de muestra a considerar es adecuado, logrando un poco más de cuatro casos por ítem. En la Tabla 2, se muestra el desglose de los 337 casos válidos para el estudio por tipo de empresa, obteniendo una mayor partición en el estudio en la empresa médica (23%), metalmecánica (19%), plástico/moldeo (19%) y electrónicas (19%).

Tabla 2. Número de encuestas recolectadas por tipo de empresa en Tijuana-Tecate B.C. Fuente: Elaboración propia

Tipo de empresa	Cantidad de encuestas aplicadas	Proporción de encuestas aplicadas
Automotriz	22	7%
Aeroespacial	22	7%
Muebles	6	2%
Electrónico	63	19%
Metalmecánica	64	19%
Plásticos/Moldeo	65	19%
Médico	78	23%
Bebidas y alimentos	10	3%
Otras	7	2%
Total	337	

El 77% de estas empresas eran de tamaño grande de acuerdo con la clasificación por número de empleados (mayor o igual a 250), el 16% mediana (menos de 250 y más de 50) y un 6% pequeña empresa (menos de 50). Entre las técnicas más mencionadas aplicadas en el proceso de cambio se encontraron SMED, sistemas Poka Yoke, elementos de sujeción, técnicas automatizadas, TPM, VSM, metodología 5S y estandarización de procesos.



El sujeto de investigación más abordado en este estudio fue el de la posición jerárquica de técnicos, quienes están más inmersos en el proceso de cambio, concentrando un 49% de casos, de ahí continúan los ingenieros con un 20%, operadores con un 15%, supervisores 11% y de gerentes solo se logró la participación del 1% de los casos y el 4% restante correspondía a practicantes, inspectores de calidad u otros que brindaban algún servicio de apoyo. Al contar con una muestra considerable para el análisis, la diversidad del tipo de empresa permite unos resultados más genéricos para la industria manufacturera de Baja California y el análisis de los diferentes sujetos que intervienen en los cambios de modelo dentro de la compañía, permitirá una evaluación de los factores críticos con diferentes enfoques.

3.3. Análisis estadístico

Mediante un análisis de varianza simple usando el software estadístico Minitab® versión 17, se comprobó la diferencia significativa entre los constructos con un valor P de 0.013 y una confiabilidad del 95%, presentándose la mayor variación en la dimensión de diseño que engloba el factor de Proceso y Producto como se aprecia en la Figura 5.

La gráfica de cajas y bigotes muestra una alta variación en las respuestas de los factores de Proceso y Producto, además de presentar una media por debajo de 4, lo que implica que los sujetos analizados difieren en las respuestas dadas en los indicadores de los factores, mientras los factores de Persona y Práctica contiene una baja variabilidad en las respuestas y media por arriba de 4, indicando que el factor implicado en las actividades de cambios rápidos está presente y controlada en las empresas analizadas, en excepción de algunas variables atípicas, en el factor Persona se muestra bajo la especialización de las personas en el manejo de equipo y alto la

comunicación efectiva para el logro de las buenas implementaciones de metodologías de cambio rápidos, mientras en el factor Práctica aparece la seguridad como áreas de oportunidad de mejora.

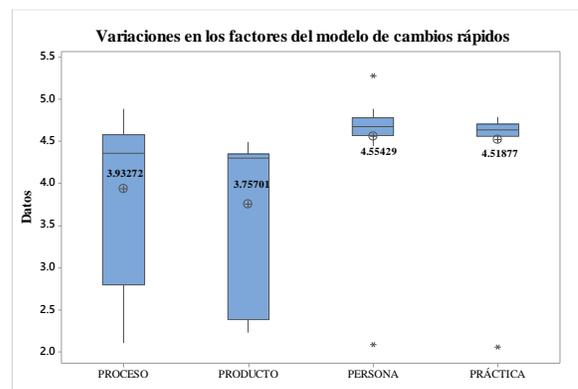


Figura 5. Análisis de medias de los indicadores de las 4Ps. Fuente: Elaboración propia.

En el análisis estadístico mostrado en la Tabla 3 se muestran en los intervalos de confianza que los factores de Proceso y Producto poseen límites inferiores por debajo de 4, además de existir un error de muestreo del 0.796, lo que implica mayor afectación debido a que pueden existir indicadores por debajo de los valores mínimos.

Tabla 3. Intervalos de confianza al 95% para los datos de la muestra. Fuente: Elaboración propia.

Factor	Indicadores	Media aritmética	Desviación estándar	Intervalo de confianza al 95% / (error 0.796)
Proceso	26	3.933	0.959	(3.621, 4.244)
Producto	7	3.757	0.998	(3.156, 4.358)
Persona	17	4.554	0.663	(4.169, 4.940)
Práctica	21	4.519	0.57	(4.172, 4.866)

Mediante el análisis del promedio de la calificación asignada, se observó que los indicadores de limpieza de equipo, equipo de monitoreo o detección de desperdicios, falta de mantenimiento, elementos especiales de transporte de herramientas, medición de los tiempos de cambio, simplificación para el cambio del molde, así como el uso de herramientas especiales del fabricante, fueron



identificadas como variables críticas en el factor de Proceso como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Valoración del factor de Proceso en la industria de B.C. Fuente: *Elaboración propia.*

Calificación	VARIABLES DE PROCESO	Calificación	VARIABLES DE PROCESO
2	Limpieza	4	Proceso manual
2	Equipo de monitoreo/ Detección de desperdicios	4	Accesos a la máquina o herramientas
2	Mantenimiento	4	Peso ligero de materiales
2	Transporte de las herramientas	4	Estandarización
3	Medición	4	Tareas dependientes
3	Simplificación	5	Identificación de piezas (color, grabado)
3	Herramientas del fabricante	5	Líneas de máquina
4	Elementos de ajustes	5	Dispositivos de Sujeción
4	Disminución del esfuerzo	5	Universalidad
4	Pocos mecanismos	5	Sistemas tolerantes a la variación
4	Dispositivos de liberación rápida	5	Manipulación
4	Ubicación herramientas	5	Sistemas a prueba y error
4	Sistema de fijación modular	5	Automatización

Mientras que en la Tabla 5 del factor de Producto se encontró como factores críticos el no contar con la documentación del producto, donde se muestran los detalles de su elaboración como planos, dibujos, rutas de trabajo, materiales, tiempo de fabricación entre otros, así como las configuraciones en los planes de producción, que involucran un mayor movimiento de recursos en el cambio.

Tabla 5. Valoración del factor de Producto en la industria de B.C. Fuente: *Elaboración propia.*

Calificación	VARIABLES DEL PRODUCTO
2	Documentación del producto
2	Configuraciones en el plan de producción.
4	Variedad de tamaños
4	Especificaciones de calidad
4	Tamaño del lote
4	Características estándar del producto
4	Variedad de modelos

Se pone de manifiesto que la industria maquiladora de Baja California muestra necesidad de implementación de mejoras en las áreas de diseño de procesos y diseño de producto, siendo estos factores básicos para la productividad y eficiencia de las empresas, este análisis muestra variables estratégicas que pueden ser consideradas para la mejora de los procesos.

4. Conclusiones

En este trabajo se lograron identificar las variables críticas que los sujetos encuestados en la industria maquiladora de Tijuana, Baja California consideran no presentes o controladas en las actividades de cambios rápidos, entre ellas; la limpieza del equipo, mantenimiento, medición, transporte de herramientas, simplificación de procesos de cambio, uso especial de herramientas del fabricante, documentación del producto y configuraciones del programa de producción, correspondiendo estas variables a la dimensión de diseño que engloban los factores de Producto y Proceso. Mientras en la dimensión organizacional se presentó un comportamiento similar en los factores en las industrias encuestados, solo manifestándose como variables atípicas críticas la Seguridad en el factor Práctica y la especialización en el factor Persona. Se recomienda a las empresas al momento de implementar o evaluar la metodología de cambios rápidos en sus procesos productivos tomen en cuenta estos factores, ya que tienen un efecto en la eficiencia del cambio y es un elemento importante para la flexibilidad del proceso, al manejar bajos tiempos en el cambio de modelo, ya que reduce los costos y aumenta la posibilidad de variación de productos, siendo esto lo que demanda el mercado “alta mezcla y poco volumen de producción”. En trabajos futuros se pretende evaluar el modelo completo por la técnica estadística de ecuaciones



estructurales y diseñar una herramienta diagnóstica con estos factores para facilitar a las empresas la identificación de sus variables crítica y hacer más eficiente el uso de recursos en las implementaciones de mejora

5. Agradecimientos

Se agradece el apoyo de las empresas de Tijuana Baja California por los datos proporcionados en este estudio y a la Universidad Autónoma de Baja California por el financiamiento otorgado para hacer posible el trabajo de campo.

6. Agradecimiento de autoría

Yuridia Vega: Conceptualización; Metodología; Validación; Análisis formal; Investigación; Recursos; Análisis de datos; Borrador original; Revisión y edición; Administración de proyecto; Supervisión. *Roberto Romero López*: Conceptualización; Metodología; Ideas; Investigación; Análisis de datos; Escritura. *Manuel Javier Rosel Solís*: Conceptualización; Ideas; Investigación; Escritura; Revisión y edición. *Edgar Armando Chávez Moreno*: Conceptualización; Investigación; Análisis formal; Revisión y edición. *Oscar Adrián Morales Contreras*: Conceptualización; Investigación; Análisis de datos; Escritura; Visualización.

1. Referencias

[1] P. R. Spena, P. Holzner, E. Rauch, R. Vidoni, and D. T. Matt, "Requirements for the Design of Flexible and Changeable Manufacturing and Assembly Systems: A SME-survey," *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 207-212, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.018>

[2] C. Gelhard and S. von Delft, "The role of organizational capabilities in achieving

superior sustainability performance," *J. Bus. Res.*, vol. 69, no. 10, pp. 4632-4642, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.03.053>

[3] R. W. Schmenner and M. V. Tatikonda, "Manufacturing process flexibility revisited," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 25, no. 12, pp. 1183-1189, 2005. <https://doi.org/10.1108/01443570510633585>

[4] P. Marks, Q. Yu, and M. Weyrich, "Survey on Flexibility and Changeability Indicators of automated Manufacturing Systems," *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, vol. 2018-Septe, pp. 516-523, 2018. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502534>

[5] H. Yamashina, "World Class Manufacturing," *Chrysler Gr. LLC*, no. July, p. 16, 2015. <https://doi.org/10.1109/EEIC.1993.631202>

[6] G. Regev, P. Soffer, and R. Schmidt, "Taxonomy of flexibility in business processes," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 236, no. June 2014, pp. 90-93, 2006.4 <http://ceur-ws.org/Vol-236/paper2.pdf>

[7] R. Europea and I. Su, "La estrategia de la empresa desde una perspectiva basada en los recursos," no. January 1996, 2015. <https://dialnet.unirioja.es/metricas/documentos/ARTREV/762781>

[8] L. C. Trevi and C. Empresarial, "Innovación y competitividad empresarial," vol. VII, pp. 55-65, 2002. <https://www.redalyc.org/pdf/376/37602005.pdf>

[9] M. P. Reik, R. I. McIntosh, S. J. Culley, A. R. Mileham, and G. W. Owen, "A formal design for changeover methodology. Part 2:



theory and background," Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., vol. 220, no. 8, pp. 1225-1235, 2006.

<https://doi.org/10.1243/09544054JEM527>

[10] Y. Vega, R. Romero-López, N. A. Barboza-Tello, A. B. Pimentel-Mendoza, and M. J. Rosel-Solis, "Indicators for Measuring Changeover Activities: Operationalization of 4Ps model of Changeovers," in Evaluating Mental Workload for Improved Workplace Performance, eEditorial Discovery® System, Ed. United States, 2019, pp. 214-236. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-1052-0.ch010>

[11] J. Escobar Pérez and Á. Cuervo Martínez, "Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización," Av. en Medición, vol. 6, no. January 2008, pp. 27-36, 2008.

<https://doi.org/10.1016/j.eatbeh.2007.10.005>

[12] M. Gómez del Pulgar García- Madrid, S. Hernández-Iglesias, A. Crespo Cañizares, A. M. Pérez Martín, M. A. González Jurado, and J. V. Beneit Montesinos, "Fiabilidad de una escala para la evaluación de competencias enfermeras: estudio de concordancia," Educ. Médica, no. xx, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.edumed.2018.12.002>

[13] Y. Vega, "Impacto de los factores de las 4Ps en las actividades de cambios rápidos. Modelo predictor para la industria manufacturera de B.C.," Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2020.

[14] T. Vargas-Halabí and R. Mora-Esquivel, "Tamaño de la muestra en modelos de ecuaciones estructurales con constructos latentes: Un método práctico," Actual. Investig.

en Educ., vol. 17, no. 1, 2017. <https://doi.org/10.15517/aie.v17i1.27294>

[15] J. Rositas, "Los tamaños de las muestras en encuestas de las ciencias sociales y su repercusión en la generación del conocimiento," Innovaciones de Negocios, vol. 11, no. 22, pp. 235 - 268, 2014, [Online]. Available:

<http://eprints.uanl.mx/12605/1/11.22Art4pp235-268.pdf>.

[16] J. Arias-Gómez, M. Á. Villasís-Keever, and M. G. Miranda-Navales, "El protocolo de investigación III: la población de estudio," Rev. Alerg. México, vol. 63, no. 2, p. 201, 2016. <https://doi.org/10.29262/ram.v63i2.181>

[17] C. E. Hernández and N. Carpio, "Introducción a los tipos de muestreo," ALERTA Rev. Científica del Inst. Nac. Salud, vol. 2, no. 1, pp. 75-79, 2019. <https://doi.org/10.5377/alerta.v2i1.7535>

[18] T. Otzen and C. Manterola, "Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio," Int. J. Morphol., vol. 35, no. 1, pp. 227-232, 2017. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>

[19] S. del trabajo y Previsión, "Informe laboral de Baja California," 2020. <http://siel.stps.gob.mx:304/>

[20] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)., "México en cifras." <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=02> (accessed Jan. 24, 2022).

[21] Gobierno de México, "Secretaría de Economía - Baja California," 2010. <http://www.2006->



2012.economia.gob.mx/delegaciones-de-la-se/estatales/baja-california (accessed Jan. 24, 2022).

[22] Industria Maquiladora de Baja California, "Maquiladoras | DIMBC," Directorio. <https://industriamaquiladora.com/maquiladoras.php> (accessed Jan. 24, 2022).

[23] Monitor Económico de Baja California., "BC con más de 24 mil subcontratados en

maquiladoras; Tijuana concentra el 74%." <https://monitoreconomico.org/noticias/2021/apr/21/bc-con-mas-de-24-mil-subcontratados-en-maquiladoras-tijuana-concentra-el-74/#detalle> (accessed Jan. 24, 2022).

[24] J. Martínez Cuero, "El impacto de las empresas transnacionales en las condiciones de vida de la población en Tijuana (México)," Rev. El Col. San Luis, vol. 9, no. 19, p. 61, 2019. <https://doi.org/10.21696/rcls19192019946>

Derechos de Autor (c) 2022 Yuridia Vega, Roberto Romero López, Manuel Javier Rosel Solís, Edgar Armando Chávez Moreno, Oscar Adrián Morales Contreras



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](#)



Methodology to implement CAE validation in repair & redesign parts process of plastic injection molds

Metodología para implementar la validación CAE en el proceso de reparación y rediseño de piezas de moldes de inyección de plástico

Natanael González-Bautista¹ , Víctor Hugo Mercado-Lemus² , Maricruz Hernández-Hernández² , Hugo Arcos-Gutiérrez³ , Isaías Emmanuel Garduño-Olvera³ 

¹Estudiante de Posgrado CIATEQ, A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Circuito de la Industria Poniente Lote 11, Manzana 3, No. 11, Col. Parque Industrial Ex Hacienda Doña Rosa, 52004, Lerma de Villada, México.

²Cátedras CONACYT – Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Ciencia y Tecnología No.790. Col Saltillo 400, 25290, Saltillo, Coahuila, México.

³Cátedras CONACYT – CIATEQ A.C., Eje 126 No. 225, Zona Industrial del Potosí, 78395, San Luis Potosí, México.

Autor de correspondencia: Natanael González Bautista, CIATEQ, A.C., Centro de Tecnología Avanzada, Circuito de la Industria Poniente Lote 11, Manzana 3, No. 11, Col. Parque Industrial Ex Hacienda Doña Rosa, Lerma de Villada, México. Email: natanaelgonzalezbautista@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7871-3017.

Received: November 26, 2021

Accepted: February 22, 2022

Published: February 25, 2022

Abstract. - *Repairs and redesigns for plastic injection molding parts generally is a short and straightforward process consisting of inspection, modeling, and evaluation. The present paper implements a methodology for redesigning and repairing injection molding parts based on the frontal process for developing concepts. The proposed methodology helps in the validation through Computer-Aided Engineering (CAE) in the designing stage using CAD software, ensuring the quality of the repair. Furthermore, the redesigned development has been carried out in the best way to obtain a better cooling, robustness, or plastic flow. In this research is implemented the proposed methodology in a Hot Runner System. Furthermore, a numerical simulation for three cases to evaluate the heat transfer and cooling times performed, finding the main differences in heat transfer due to drilled or milled rectangular channels, minimizing the time to reach ejection temperature and mold/part temperatures.*

Keywords: CAE validation; Injection molding; Redesign & repair inserts.

Resumen. - *Las reparaciones y rediseños de piezas de moldeo por inyección de plástico generalmente son un proceso corto y directo que consiste en inspección, modelado y evaluación. El presente trabajo implementa una metodología para el rediseño y reparación de piezas moldeadas por inyección basada en el proceso frontal de desarrollo de conceptos. La metodología propuesta ayuda en la validación mediante Ingeniería Asistida por Computador (CAE) en la etapa de diseño mediante software CAD, asegurando la calidad de la reparación. Además, el desarrollo rediseñado se ha realizado de la mejor manera para obtener una mejor refrigeración, robustez o fluidez plástica. En esta investigación se implementa la metodología propuesta en un Sistema Hot Runner. Además, se realizó una simulación numérica para tres casos para evaluar la transferencia de calor y los tiempos de enfriamiento, encontrando las principales diferencias en la transferencia de calor debido a los canales rectangulares perforados o fresados, minimizando el tiempo para alcanzar la temperatura de eyección y las temperaturas del molde/pieza.*

Palabras clave: Validación CAE; Moldeo por inyección; Rediseño y reparación de inserciones.



1. Introduction

Packaging and containers industries widely use polymers due to their excellent mechanical properties, thermal properties, and chemical resistance [1]. For the fabrication of polymeric parts, the injection molding process is one of the most important, and it is used to process more than 1/3 of all plastic pieces [2, 3]. This manufacturing process is widely used in civil and mechanical construction, automotive components, aerospace, aeronautical industries, transportation equipment, and household products [4]. Product and part design are essential areas related to plastic injection molding design, all of which contribute to the quality of the molded product and production efficiency [5]. This process involves many process parameters such as melt temperature, gate design, filling, and cooling times strongly affect both part quality and cycle time [6].

The injection molding process comprises four essential stages: mold cavity filling, melt packing, solidification (cooling), and ejection [7]. Although one of the most critical stages in the cycle is the cooling time, it plays a crucial role in injection molding by taking more than half of the molding cycle time and affecting the plastic part's final quality and mold productivity [8].

The general mold design has two parts: the creation of the part and the design of the mold [9]. The mold design includes the mold base, designing the core and cavity, components, coolant channels, creating returning pin, adding ejector pin, creating gate and runner, adding locating ring and sprue bushing in sequence [10].

A two-plate mold with some of the essential components and parts is shown in Figure 1 [11].

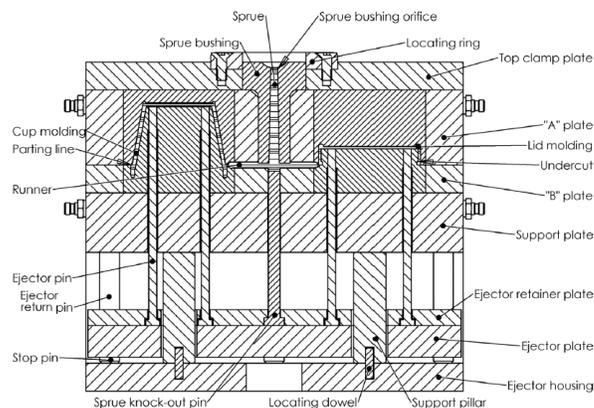


Figure 1. Cross-section view of a two-plate mold [11]

Generally, the cooling mold parts are manufactured by standard processes that consist of a pattern of drilled holes to pass coolant through the mold plates and connected by hoses to form a continuous pathway [10]. Many different cooling systems designs are used in practice. While many molds use straight lines, such designs are often not optimal [11]. The layout of the cooling channels is currently carried out by experienced designers who usually take as a reference set of geometric criteria based on their experience and related to dimensional values of depth and separation between channels [12]. When the injection process is completed, the filling time is only 20%, while the proportion for cooling is about 80%, so the cooling system is essential amongst the injection mold design factors [13].

Computers have aided the plastic injection mold design for an extended life cycle. Various authors have developed program systems that help engineers design part, mold, and selection injection molding parameters. [14]. In many times the process to repair or redesign is not documented, and it depends on the experience and judgment of the designer [12] or the mold tooling room. Frequently, the repair or redesign of mold pieces inferred the development of new geometries, the manufacture of the same



components but longer dimensions, or the exploration of new manufacturing processes and materials [15]. In the case of redesigning applying additive manufacturing, there are plenty of opportunities, benefits, and freedoms, especially at the design part level [16].

The development of new mold pieces without the theoretical basis is complicated, mainly due to the lack of knowledge of the correct gain of efficiency or improved qualities. Therefore, the latest are fundamental reasons to implement a methodology to validate the Computer-Aided-Design (CAD) stage and ensure the efficiency of the repair or redesign process.

Mold reparations take a long time, especially the parts in contact with high wear due to closing pressures, wrong operation, or poor maintenance. When mold has worn out, the mold shut off areas show signs like dragging, compaction, rounded edges, or analyzing the injected part, where the presence of quality defects like a difference in thickness, heat marks, gas marks, scratches is evident or surface finishes. The reparation complexity and scope will depend on the size and construction of the mold. Generally, molds are tools designed and planned for a long-life cycle to facilitate the maintenance, repair, and replace components like spare parts. For example, a plastic part quality generates defects due to a wear insert at the cavity that needs to be repaired. In this case, it is easier to manufacture and adjust it rather than manufacture the entire cavity and adjust with components.

Repair workshops worldwide are scarce; hence when injection molds are simple with two or three plates, it is easier and cheaper to manufacture a new mold due to the complexity involved in repairing molds. On the contrary, it is easier to repair damaged parts by cutting molds to continue producing plastic parts due to complexity. Some of

the main objectives and activities as a mold tooling room are repair molds, improving efficiency or product quality by a mold modification that can include the manufacture or redesign of new pieces, product updates, or injection runner system improvements. Getting better efficiency is an objective to follow in our mold reparations and redesigns. One of the most common workflows that consist of repairing or redesigning mold parts is shown in Figure 2. The process is short and effective when the reparation is easy, but the current approach is insufficient when considerable reparations or redesigns are needed.

Some methodologies have been successfully applied in additive manufacturing, as mentioned in [15]. In the reference, the authors introduce a study case to create a Design for Additive Manufacture (DfAM) from a conventional manufacturing piece or an automated process to redesign mold cooling pieces [12]. Generally, the implemented and documented methods are applied to the design and manufacture of molds and mold pieces, but no processes help in the redesign and repair of molds [15].

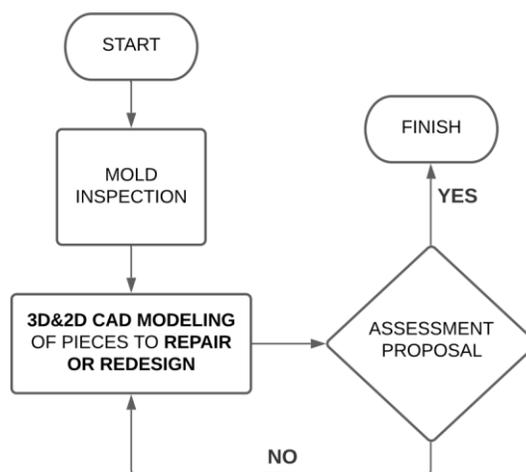


Figure 2. Current workflow to repair or redesign mold parts.



CAD software is helpful to design mold pieces and perform modifications that help model a correct mold part. However, CAD software and experience are not enough when it comes to new parts design. From this point, it is necessary to look for new engineering tools that give certainty that the redesigned part will behave as expected and improve in aspects such as the efficiency of the mold reflected in the quality of the final plastic product. After extensive research, commercial Computer Aided-Engineering (CAE) packages such as Moldex3D [17] or MOLDFLOW [18] are now widely used in practice to analyze a given part design or mold design [19]. The CAE methods can predict temperature, pressures, times to improve the CAD stage and mold efficiency by simulating the injection plastic process [20]. For example, Figure 3 shows an injection process simulation in Moldex3D.

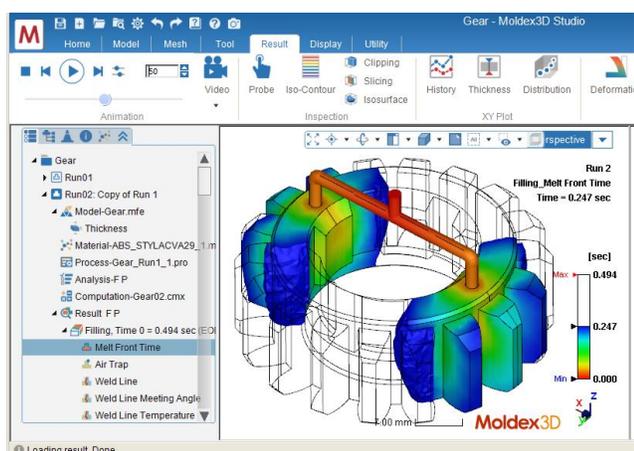


Figure 3. Moldex3D, plastic injection molding simulation [21].

A typical redesign process at the tooling workshop is implementing Hot Runner Systems (HRS) to old molds with Cold Runner Systems (CRS). HRS provides better parameters for injection molding and makes the most efficient process, an excellent reason to implement in almost all new molds [22]. In the implementation of HRS, the engineering design have to consider a temperature increase,

flow rate, turbulences by corners, injection point profiles, overheating in some pieces, into others [23]. In practice, the implementation of HRS is necessary to redesign the cooling system, gate profile, and sprue bushings to avoid heating problems and make the most efficient injection process. CAE packages are widely used in the new cooling system design in HRS implementation [24].

In filling imbalance problems, CAE Software is widely used. The flows of molten polymers in injection molds are unsteady, non-Newtonian, and non-isothermal flows occur at very high deformation rates. Such complex flows can only be modeled numerically, e.g., using FEM (Finite element method) computations [25]. It is necessary to remember that some factors like injection polymer melt pressure, temperature, shear rate, and others during the mold filling process will affect the melt rheological properties [26]. In this context, a CAE tool can help predict the behavior to avoid quality problems.

The CAD-CAE integration system does not lead to modifying the analyzed model as an analysis result but predicts the behavior of the piece simulated [27]. The following section presents the structured methodology proposed for redesigning and repairing mold parts implementing the CAE Validation.

2. Methodology to implement CAE Validation

Computational technologies are a widely used and essential tool for the engineering field, such as plastic mold design. Without a doubt, every facet of design, analysis, simulation, and manufacturing improves with the help of CAE techniques [28]. However, the current repair and redesign plastic mold parts process rarely



has a validation stage because sometimes new mold concepts are copied and applied to molds with old ideas, or repair is done based on the judgment and experience of the designer. Generally speaking, this practice can improve or worsen the mold's performance, so validating the CAD models through a Computer-Aided Engineering (CAE) stage is necessary to improve cooling parts, plastic flow, robustness, and others. As is mentioned in [29], each mold designed has its process and specific knowledge. The initial stage design defines costs, delivery time, and mold manufacturability [30]. In the process of redesigning and repairing plastic mold pieces, it is similar; the first step consists of analyzing the scope to set general objectives to achieve by the designer.

As an essential process of production and because of mold and product design, in [31], the authors perform a study about Taguchi's design of experiments to determine the optimal process parameters for injection molding to determine mainly melt temperature, injection pressures, packing pressures, packing time, and cooling time.

The last examples are some of many methodologies to implement in the design of plastic products, plastic injection mold, or injection process, but now, applying these processes to the daily repair tasks may not work in the same way and provide good results. Therefore, the latest is a reason to develop an especial methodology to implement in our current redesign and repair process.

2.1 Redesign process methodology

The proposed methodology is based on the front-end process for concept development. For example, see Figure 4, containing numerous interrelated activities, roughly ordered [32] and the already existing process (mentioned in the flow

diagram in Figure 2) taking the essential stages, such as inspection and CAD modeling. Then to strengthen and improve the process, different locations were added.

The base of the current repair process is to define the scope, objectives, and specifications firstly achieved with the modeling and experience. The following steps correspond to implementing the validation stage through a CAE application, which should guide the way forward; it means adding extra steps for the prototyping and selection before CAE simulations. Based on the general lineal process of the design shown in Figure 5 [33], the different stages through product design from a "Problem Identification" to "Result in Documents" are followed.

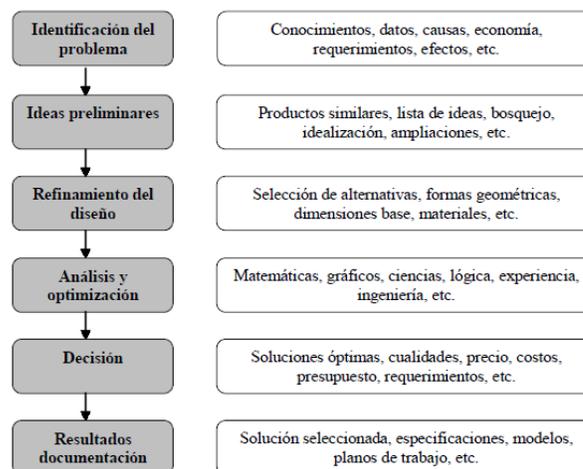


Figure 5. General lineal Design Process [33].

Next is depicted the proposed methodology to implement in the redesigning and repairing process, Figure 6.

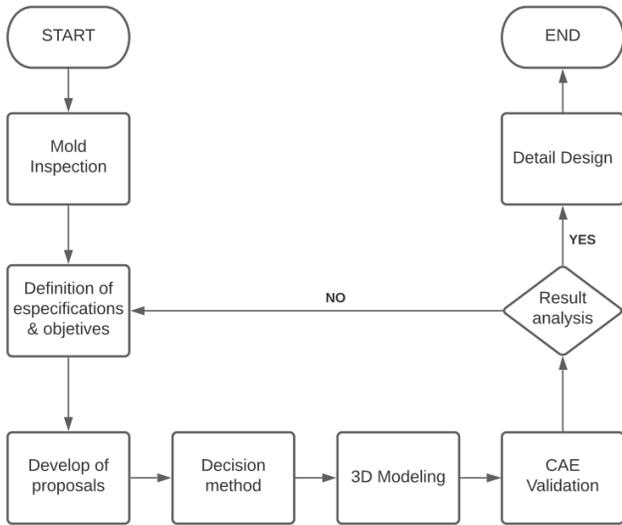


Figure 6. Proposed flow diagram to the methodology of CAE validation.

The first step is the physical inspection of the mold and plastic part, with the respective documentation

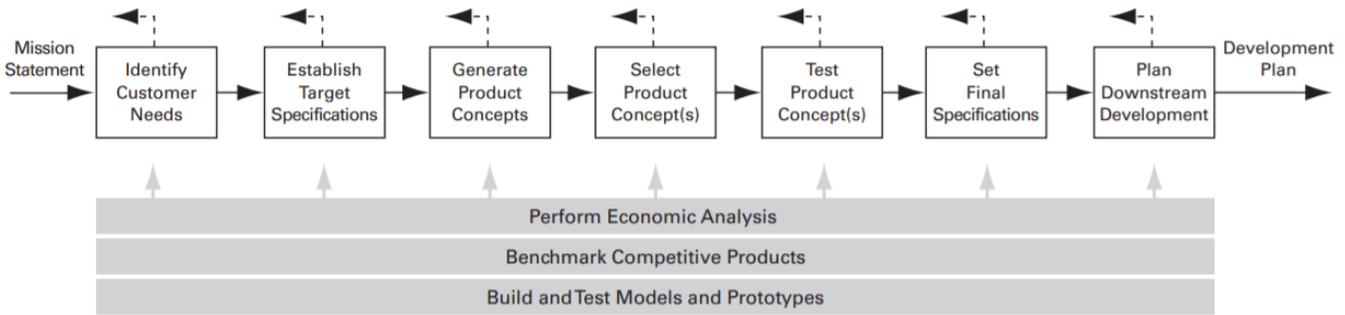


Figure 4. The various initial activities comprise the concept development phase [32].

Once the proposal is defined, the next step, "Prototypes selection," is used to choose the best option (by a decision matrix method). That allows identifying, analyzing, and evaluating the different proposals raised [32] and selecting the best one that sticks to the repairing program, cost, machinability, and other aspects to consider.

The CAD model is defined with the CAE system's necessary characteristics to make decisions [5]. The fifth step consists of the Prototypes debugging: "CAE Validation," which, by applying temperatures, pressures,

for the final stages. After mold inspection, the second step is "Establish specifications and objectives" that help define the scope of the repair, considering the current conditions of the mold, characteristics of the plastic part, and behavior of the tooling in production. The final stage corresponds with why repair or implement the redesign, focusing on one or more problems.

The specifications and definitions of the CAD problems are established under features related to improvement and validation [12]. In addition, it is necessary to define specific materials and geometries as they are redesigned into new parts.

injection, or mold conditions, it is possible to know if the CAD product concept will behave according to the proposed stage two. This stage helps know if the specified materials and geometries are adequate to meet the objectives and specifications previously set up or achieve a theoretical gain in cooling efficiency or part robustness.

The sixth step is crucial for the process: "Result from the analysis." This step is based on the analysis, and the decision to continue must be taken towards the final stage or return to step two



and redefine the problem. Although this may not always be the case, if the analysis of results is not consistent, it is possible to return to the previous step and validate that the boundary conditions were correctly applied, in this way, ensuring the integrity of the results.

Once a CAE stage has validated the results, the methodology finishes in the seventh step, "Detail design," which includes the complete specification of the geometry, materials, and tolerances of all unique parts of the product. This stage provides product control documents, that is, the drawings or files that describe the geometry of the pieces [32]; in the operation of redesign or repair, the assessment is an important file.

3. A repair case study

In this case, a base cavity insert redesign is achieved through two objectives: update the hot runner injection system and improve the cooling at this piece. From the literature, it is very well known that changing the injection system from cold runner to hot runner will increase the heat transfer. Hence it is necessary to redesign the cooling system. The proposed methodology in Figure 6 is used in this case study to prove the new stages. Due to that, the first stage, "Mold Inspection," must be a physical activity and has no changes in process (see Figure 2); this case study will start in step two, "Definition of specifications and objectives." The plastic product to analyze is a 30 liters capacity rectangular container, see Figure 7.



Figure 7. 30 The rectangular container.

3.1 Definition of specifications and objectives

After "Mold Inspection," it is possible to start the establishment of the Objectives and Specifications:

Specifications:

1. Keep original sizes of the piece; it must consider a refurbish to assembly.
2. The surface molding finishes must be the same.
3. Apply the newest design standards.

Objectives:

1. Make three independent flow water-cooling circuits.
2. Keep an almost equal heat transfer on molding surfaces.
3. Know the gain heat transfer.
4. Make the CAE validation with two different materials in sprue bushing.

The specifications and objectives were established by mold repair and redesign pieces experience; the designer can add more during the process.



3.2 Develop of proposals

The original design (the original cavity, made in 1989, is shown in Figure 8.) offers a piece with a "grid" of holes and copper plugs to create a flow water circuit; in this design, the sprue bushing does not have a water-cooling.

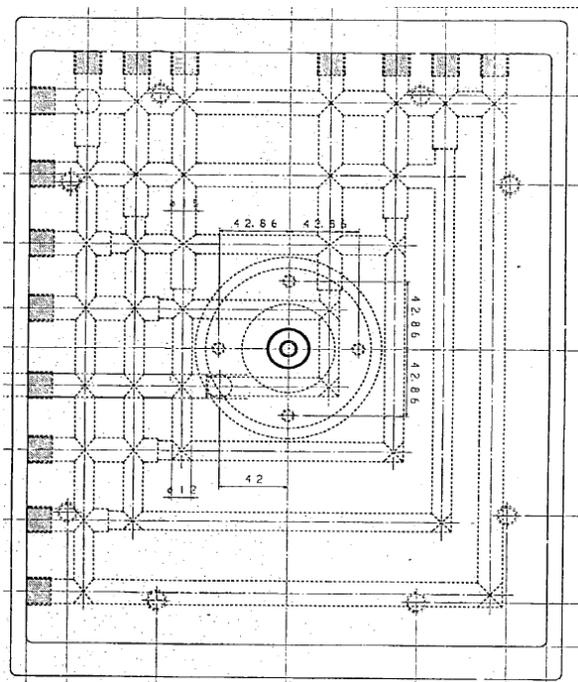


Figure 8. View of original cavity base cooling design.

The cooling circuit shown in Figure 9, once implemented in a similar plastic product of 20 liters of capacity, produced the cycle time was improved in 8 seconds, with the advantage of an evident reduction of the quality defects.

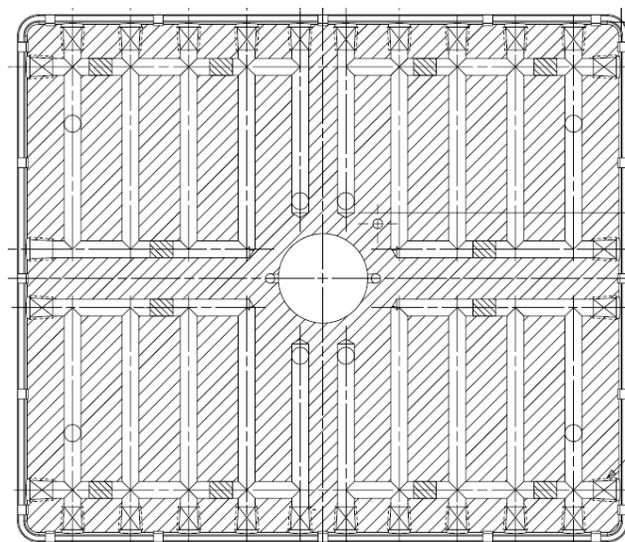


Figure 9. Cross-section of implemented cooling.

Uniform flow distribution helps improve the thermal conductivity of coolant, cooler parts, and heat transfer applications in medical, fuel cells, solar panels [34]. However, having a maldistribution in high heat flux cooler parts will be a reason to decrease efficiency systems [35].

Although circular cross-sections are the most common profiles [10], additive manufacturing explores other non-circular section cooling profiles such as square, rectangular, diamond elliptical, trapezoidal, and other polygons [36]. Notwithstanding, this manufacturing technique is expensive. This research considers two cross-section cooling profiles: circular and half-circular (see Figure 10). In the first case, Figure 10a has a non-constant distance between the molding surface and the CC (cooling channel) surface; this problem could be solved by a parallel section CC to the molding surface as shown in Figure 10b, further, to enhance the uniformity of heat dissipation [37].

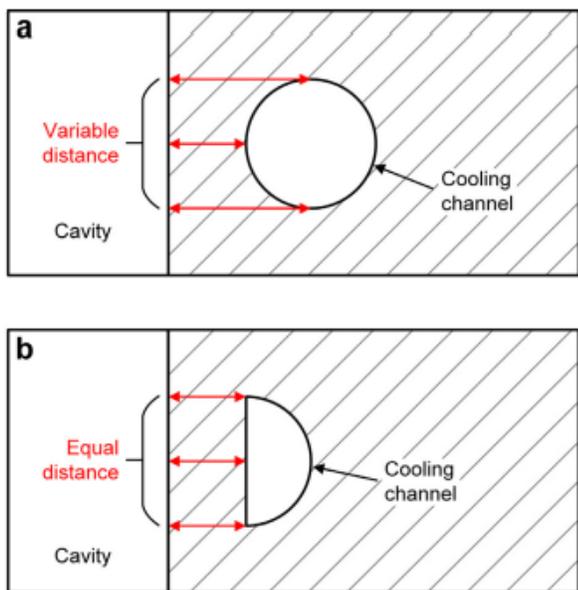


Figure 10. (a) circular cooling channel and (b) parallel profile cooling channel [37].

The proposals consider keeping the original sizes but manufactured in two pieces to make an internal continuous water channel. In general, the fabrication of old parts corresponded to one steel piece.

As a sub-step, sketches were developed to analyze different ways to improve the system cooling in configurations and cross-section profiles. Finally, the CAD models are defined the coolant inlet and outlet.

The parts' manufacturing dimensions are 420.0 x 380.0 x 85.0 mm; it is then expensive to use additive manufacturing to create an internal cooling system. The solution to this inconvenience is to divide the mold part into two pieces: base cavity and insert Figure 18. This manufacturing method helps to design a particular channel configuration, as shown in the following proposal sketches.

The first proposal consists of two parts and two milled channels. It is necessary to think about the simplest way to refresh the cavity base, with two inlet/outlet and sprue cooling circuits. The inconvenience of this configuration could be the distance route; probably at a medium distance, the water is hot, see Figure 11. Finally, the proposed channel profile is rectangular.



Figure 11. Sketch proposal 1: two parts, two milled channels.

Regarding proposal two: it considers four circuit drilled channels. Here, the main idea is due to a similar product geometry in its container and good cooling results obtained to implement these drilled hole configurations (see Figure 12).



Figure 12. Sketch proposal 2: implemented cooling circuit.

Proposal 3 comes from various equal distributions [35]; the main problem is the space between the inlet/outlet water; in this case, there is no way to the coolant, see Figure 13.



Figure 13. Sketch proposal 3: two parts, manifold equal distribution.

Fourth proposal: considers two parts and the circular milled channels taking advantage of the plastic distribution inside the cavity. It is needed to remark that the cooling configuration is made by a radius from the center to edges to get a better heat distribution by the rectangular profile channel to the injected plastic flow, as shown in Figure 14.



Figure 14. Two parts: circular milled channels.

3.3 Decision Method

Concept selection is an extensive process that can include sub-iterative stages associated with concept generation and testing. A design team can refine and improve concepts by ways such as concepts screening and scoring [32].

Once the general concept of the scheme has been developed, it is necessary to carry out the process of selecting one or two proposals to perform the numerical simulation for the new mold part.

The process of "Concept Screening" aims to narrow the number of concepts quickly and improve them. Table 1 shows the scoring.



Table 1. The concept screening matrix.

Selection criteria	Concepts				
	Old Cooling (REF)	4 Circuit drilled channels	2 parts, 2 milled channels	2 parts, manifold equal distribution	2 parts, circular milled channels
Economic					
Use of steel	0	0	-	-	-
Manufacturing hours	0	0	-	-	-
Fitting hours	0	0	-	-	-
Metrology hours	0	0	-	-	-
Temper	0	0	0	0	0
Manufacturing					
Facility to manufacture	0	0	-	-	-
Design					
Cooling set	0	-	-	+	+
Cooling chanel profile	0	-	+	+	+
Innovative	0	0	+	+	+
Facility to Inlet	0	+	+	-	+
Facility to Outlet	0	+	+	-	+
Use update standard	0	-	+	+	+
Fitting process					
Facility to fitting	0	0	-	-	-
Use of Plugs	0	-	+	+	+
Sum +/s		2	6	5	7
Sum 0's	14	8	1	1	1
Sum -/s		4	8	8	6
Net Score	0	-2	-2	-3	1
Rank		2	2	3	1
Continue?		YES	YES	NO	YES

The selection process in the screening matrix is based on general information to delete or improve the proposals. The characteristics to evaluate the "Scoring process" are more specific and help a team choose one or two options for the following product development stage. Because the variables involved are economical, manufacturing, fitting, and design, it is impossible to place an Equitable evaluation scale. Generally, it is easiest to focus a discussion by rating all the concepts concerning one criterion at a time, as shown in Table 2.

Table 2. Rate the concepts

Relative performance	Rating
Much worse than reference	1
Worse than reference	2
Same as reference	3
Better than reference	4
Much better than reference	5

Table 3 presents the final scoring selection matrix.

Table 3. The scoring matrix.

Selection criteria	Weight	Concepts							
		Old Cooling (REF)		4 Circuit drilled channels		2 parts, 2 milled channels		2 parts, circular milled channels	
		Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score	Rating	Score
Economic	40%								
Use of steel	5	3	0.15	3	0.15	2	0.1	2	0.1
Manufacturing hours	10	3	0.3	3	0.3	2	0.2	1	0.1
Fitting hours	10	3	0.3	3	0.3	2	0.2	2	0.2
Metrology hours	5	3	0.15	3	0.15	2	0.1	2	0.1
Temper	10	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Manufacturing	10%								
Facility to manufacture	10	3	0.3	3	0.3	2	0.2	2	0.2
Design	40%								
Cooling set	10	3	0.3	4	0.4	2	0.2	5	0.5
Cooling chanel profile	10	3	0.3	3	0.3	5	0.5	5	0.5
Innovative	5	3	0.15	3	0.15	4	0.2	5	0.25
Facility to Inlet	5	3	0.15	4	0.2	2	0.1	5	0.25
Facility to Outlet	5	3	0.15	4	0.2	2	0.1	5	0.25
Use update standard	5	3	0.15	3	0.15	4	0.2	5	0.25
Fitting process	10%								
Facility to fitting	5	3	0.15	3	0.15	4	0.2	4	0.2
Use of Plugs	5	3	0.15	3	0.15	5	0.25	5	0.25
Net Score		3	3	2	3.2	4	2.85	1	3.45
Rank									
Continue?		To simulate		To simulate		NO		To simulate	

According to the scoring selection matrix, the best proposal to simulate is the fourth concept which considers two parts and circular milled channels. However, as mentioned previously, the implemented idea in proposal two is similar to a previous product. Therefore, a numerical simulation of the current cooling system will be performed as a reference.

3.4 Develop 3D models

The geometries considered in the following proposals were developed in the CAD software of the company Siemens, denominated NX 12 [38].

Proposal 1

Here the consideration goes to the original design (see Figure 8); in this way, the correct heat distribution could be known and give another reason to redesign the current cooling system knowing the zones with bad heat transfer, to implement the new HR system.

Proposal 2

In this proposal, drilled holes are made through the steel piece to create a continuous water circuit, manufacturing in one steel piece; see Figure 15a to Top view and Figure 15b for cross-section view.

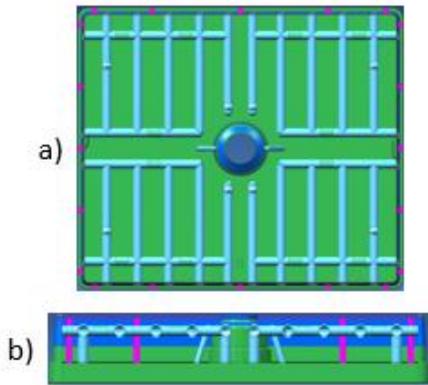


Figure 15. 3D model of proposal 2, a) top view and b) section view.

Proposal 3

The cooling circuit set designed in this consideration needs to have a correct fix configuration and a balanced inlet/outlet water; Top view and a cross-section view are shown in Figure 16a and Figure 16b as corresponding.

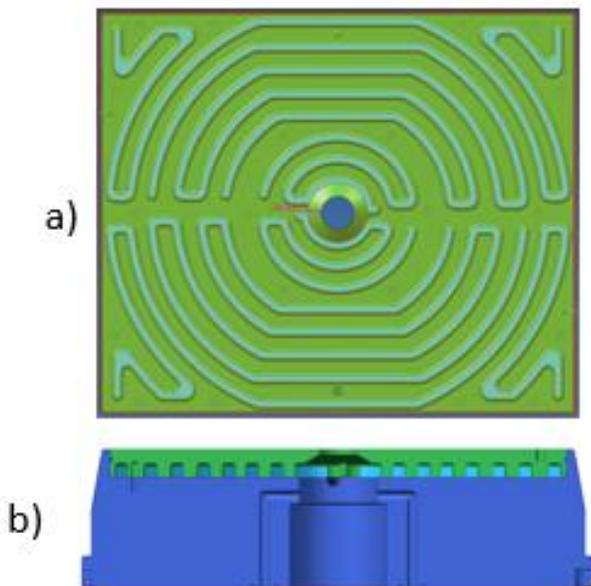


Figure 16. Proposal 3 a) top view and b) section view.

3.5 CAE validation

The objective of the simulation is to know the temperatures of plastic, flow, and cooling behavior to analyze if a new cooling system will be good or bad. The numerical simulations were performed in Moldex3D, software for injection plastic simulation. First, the cooling and product were modeled to a case setting. Second, the proposed cooling cases, current cavity, and core cooling had to be modeled according to original specifications. Next, Figure 17a presents the current circuit cooling modeled in green; then, Figure 17b shows the final cooling proposal 2 with sprue bushing cooling and four inlet/outlet. Finally, Figure 17c shows the milled circular cooling circuit of proposal 3.

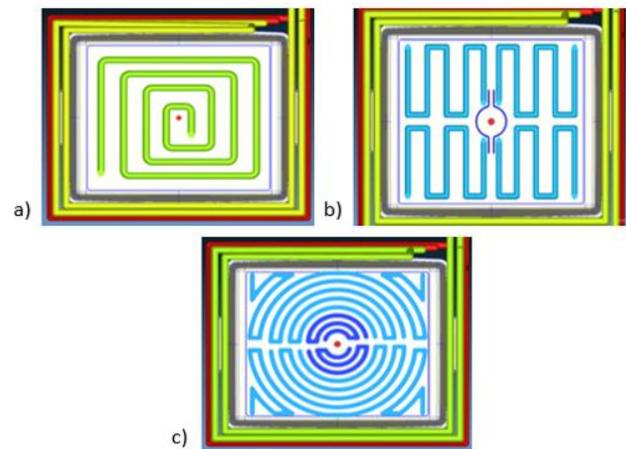


Figure 17. Final 3D cooling model a) current design, b) proposal 2, and c) proposal 3.

The numerical simulation mesh was performed, as shown in Table 4.



Table 4. Characteristics of the numerical simulation meshes.

Simulation Cases				
Case	Proposal	Mesh type	Solid mesh elements	Part Elements
1	Current cooling system	Solid	12,336,957	1,906,919
2	4 circuit drilled holes	Solid	12,697,834	2,046,808
3	Circular circuit, milled channels	Solid	13 719 226	2,046,808

The used polymer was a Polypropylene (PP), Braskem manufactured with the grade name Braskem PP CP 442 XP, with a viscosity behavior shown in Figure 18.

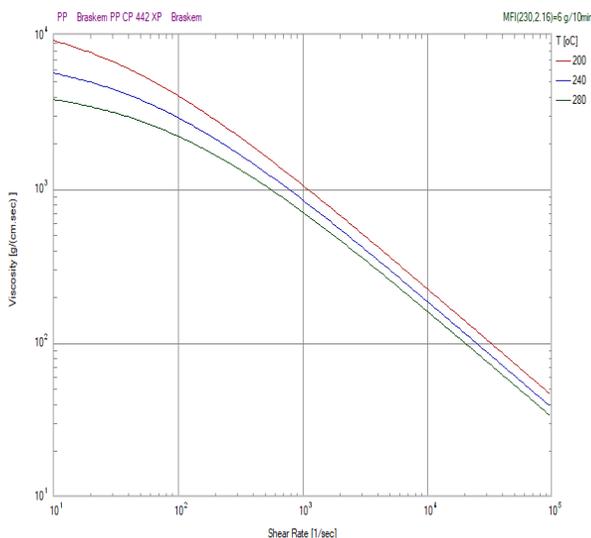


Figure 18. Braskem PP Viscosity-shear rate plot at three temperatures 200 °C, 240 °C, and 280 °C

The injection process was performed with parameters shown in Table 5.

Table 5. Process condition parameters.

Process Condition				
	Item name	Current cooling system	4 circuit drilled holes	Circular circuit, milled channels
Filling	Filling time	4 sec	5.22 Sec	5.22 Sec
	Melt temperature	200 °C	230 °C	230 °C
	Mold temperature	35 °C	35 °C	35 °C
	Max. pressure	140 MPa	140 MPa	140 MPa
	Injection volume	1391 cc	1391 cc	1391 cc
	Injection system	Cold Runner	Hot Runner	Hot Runner
Packing	P. Time	4 sec	4 sec	4 sec
	Max. Pressure	140 MPa	140 MPa	140 MPa
Cooling	Cooling time	7 Sec	7 Sec	7 Sec
	Ejection temp.	108 °C	108 °C	108 °C
	Air temperature	25 °C	25 °C	25 °C

Once the process is OK and saved, continue to analysis type. To this simulation, a "F P C W" (Filling, Packing, Cooling, and Warpage) was selected to get Injection results. Now, the numerical simulation can be performed for the data analysis.

3.5 Result Analysis

The interpretation of the results is crucial for repairing or redesigning the mold or molding parts. It is derived from comparing the two results vs. the original cooling concept.

The cooling temperatures show the distribution of the current plastic product. In Proposal 2, **Figure 19b**, a difference in cooling temperature is visible due to variable distance from molding area to drilled hole; this is a cause of defects like warpage and deformation or different shrinkage. In proposal 1, the difference is minor according to cold runner injection, **Figure 19a**. Proposal 3, **Figure 19c**, has a good temperature distribution due to equal distance from molding surface to cooling channel; this helps to reduce quality defects like deformation.

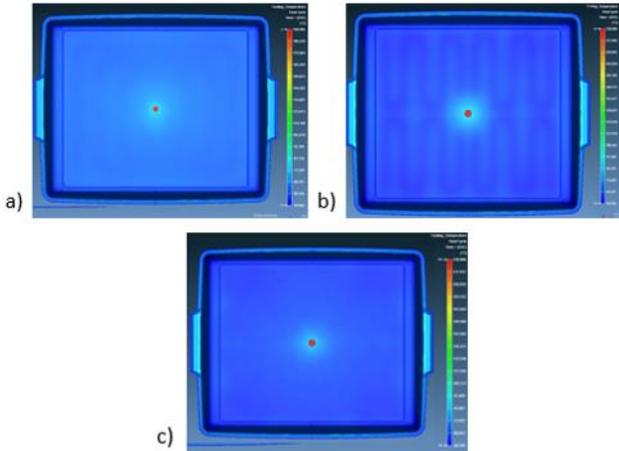


Figure 19. Cooling temperatures in a) current, b) proposal 2, and c) proposal 3.

According to the polymer maker, the safe time to reach ejection temperature (TTRET) is when the plastic part is at the temperature of 108°C or lower. Therefore, due to a cold runner injection and minor injection temperature, the best option is proposal 1, with a TTRET average of 4.4 secs with 65% of total volume, Figure 20. Proposals 2 and 3 have a similar behavior due to injection setup, but the injection parameters are different to make the injection process better and increase the temperature. The result is a better response in the cooling system, see figure 20.

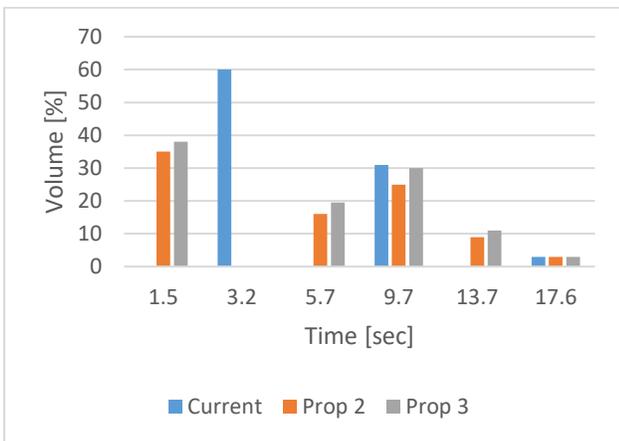


Figure 20. Histogram TTRET.

With the current cooling system, Figure 17a, the maximum cooling temperature in thickness is 110°C in 81% of total volume. Therefore, the best option is proposal 3; according to figure 21, 41% of the volume is at 110°C, and 42% is at 115°C; instead, proposal 2 the 42% is 127°C, heater that proposal 3 and current condition.

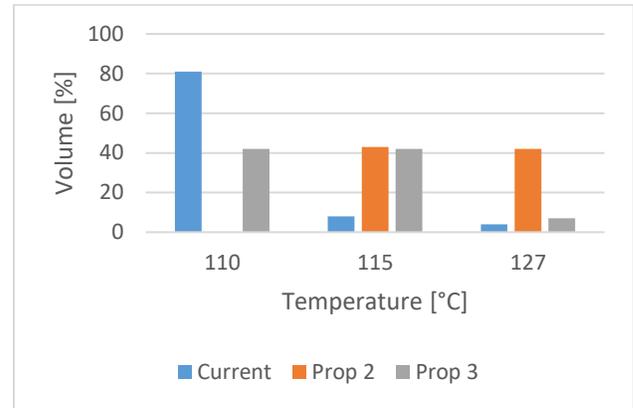


Figure 21. Maximum cooling temperatures.

The mold temperature differences (figure 22) show the final cavity and core at the end of cooling time; even proposals 1 and 3 have good heat conductivity. Proposal 3 is the best due to a higher injection temperature, Figure 22c. Proposal 1, Figure 22a, has a good mold temperatures distribution with an average of 10°C. Proposal 3, Figure 22b, shows the heat transfer pattern due to the profile cooling channel; its design has cooler lines caused by the circular drilled channel.

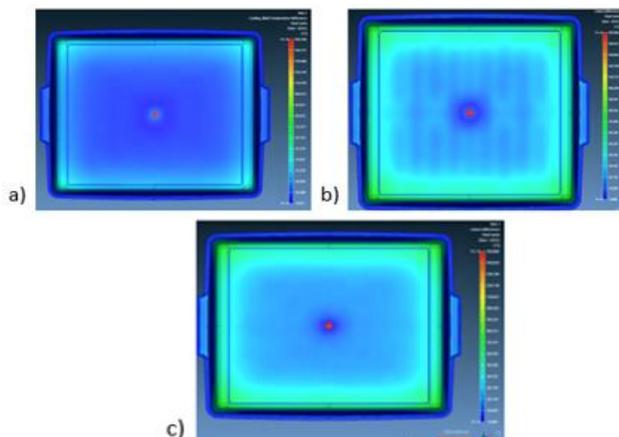


Figure 22. The mold temperature difference in a) current system, b) proposal 2, and c) proposal 3.

Even proposals two and three have similar behavior. Therefore, the best option is proposal three due proposal two has a different heat difference. However, this will cause problems like deformation, heat zones, and a higher cycle time.

3.5 Detail design

Once the analysis of the results, it is necessary to work on the final dimensions of the 3D models, create the 2D drawings (with GD&T specifications) and finalize the assessment format to indicate processes and sub-processes involved in the parts modified. Finally, it is necessary to detail the critical aspects in the 3D models, the 2D drawings (exploded and assembled), BOM (for large assemblies), and assessment.

4. Conclusions

The proposed methodology can be used for repairs and redesign. In this research, the results were essential to making the right decisions about CAD Models to simulate, what kind of results to calculate and analyze, and finally, define the proper way to take in repair or redesign with a CAE-Theoretical base.

The validation by Computer-Aided Engineering is a stage that reinforces the designer's experience and facilitates decision-making for inexperienced engineers in the repair and redesign of molded parts.

In this study, the results are significant for choosing an accurate cooling system to reduce cooling cycle time, improve the quality of plastic products, and avoid different temperatures during the cooling stage. Otherwise, the mold modification could be implemented in a cooling system like **Figure 15**, causing cooling problems and quality issues like deformation.

The numerical simulation helped avoid the mold repair, rework and carry out a successful repair in a single intervention, avoiding production delays, reprogramming the production of molds, and wasting time due to a machine without a mold. The methodology to implement CAE validation is a tool that modifies the process of redesigning and reparation of molded parts. At first glance, it seems to lengthen the process, but the reward of that extra time of analysis and validation consists of avoiding the rework of a failed repair.

5. Acknowledgements

N. Gonzalez gratefully acknowledges support from Posgrado de CIATEQ. I. E. Garduño, and H. Arcos-Gutiérrez gratefully acknowledge support from Cátedras CONACYT program through project No. 674. V. H. Mercado-Lemus, and M. Hernández-Hernández acknowledges support from Cátedras CONACYT program through project No. 850.



6. Authorship acknowledgements

Natanael González: Conceptualización; metodología; validación; escritura; revisión; administración de proyecto; software; investigación; visualización; escritura borrador; escritura revisión y edición. *Víctor Hugo Mercado-Lemus:* Conceptualización; metodología; validación; escritura; revisión; administración de proyecto; software; visualización. *Maricruz Hernández-Hernández:* Conceptualización; metodología; validación; escritura; revisión; administración de proyecto. *Hugo Arcos-Gutiérrez:* Conceptualización, metodología, validación, escritura, revisión, administración de proyecto, análisis formal. *Isaías E. Garduño:* Conceptualización; metodología; validación; escritura; revisión; administración de proyecto; escritura borrador; escritura revisión y edición.

References

[1] L. Techawinyutham, J. Tengsuthiwat, R. Srisuk, W. Techawinyutham, S. M. Rangappa. and S. Siengchin, "Recycled LDPE/PETG blends and HDPE/PETG blends: Mechanical, Thermal, and Rheological Properties", Journal of Materials Research and Technology, to be published. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.052>.

[2] A. Torres-Alba, J. M. Mercado-Colmenero, J. D. D. Caballero-Garcia, and C. Martin-Doñate, "A Hybrid Cooling Model Based on the Use of Newly Designed Fluted Conformal Cooling Channels and Fastcool Inserts for Green Molds". Polymers, vol. 13, pp. 3115. September 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13183115>

[3] R. C. N. Barbosa, R. D. S. G. Campilho and F. J. G. Silva, " Injection mold design for a plastic component with blowing agent". Procedia Manufacturing, vol. 17, pp. 774–782. June 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.128>

[4] M. Altan (2010)." Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and

neural network methods. *Materials & Design*", vol. 31(1), pp. 599–604, June 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.049>

[5] Y. M. Deng, Y. C. Lam, S. B. Tor and G. A. Britton, "A CAD-CAE integrated injection molding design system". *Engineering with Computers*, Vol. 18, pp. 80–92. 2002. <https://doi.org/10.1007/s003660200007>

[6] M. C. Song, Z. Liu, M. J. Wang, T. M. Yu, and D. Y. Zhao, "Research on effects of injection process parameters on the molding process for ultra-thin wall plastic parts". *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 668-671. November 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.103>

[7] A. Agazzi, V. Sobotka, R. Le Goff, D. Garcia and Y. Jarny, " A Methodology for the Design of Effective Cooling System in Injection Moulding". *International Journal of Material Forming*, Vol. 3(S1), pp. 13–16. ISSN 1960-6214 [consultado el 6 de octubre de 2021]. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-0695-2>.

[8] D. E. Dimla, M. Camilotto, and F. Miani, "Design and optimisation of conformal cooling channels in injection moulding tools". *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 1294–1300. February 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.162>

[9] D. V. Rosato, "Injection molding handbook" (2nd ed.). Chapman & Hall.

[10] HUANG, Ming-Shyan and Ming-Kai HSU. "Modular design applied to beverage-container injection molds". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*", vol. 53, pp. 1–10, June 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2796-y>.

[11] D. O. KAZMER "Injection Mold Design Engineering". Hanser Gardner Publications, 2007. ISBN 9781569904176. <https://doi.org/10.3139/9783446434196.fm>

[12] J. M. Mercado-Colmenero, M. A. Rubio-Paramio, J. J. Marquez-Sevillano and C. Martin-Doñate, "A new method for the automated design of cooling systems in injection molds". *Computer-Aided Design*, vol. 104, pp. 60–86, May 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2018.06.001>.

[13] J. C. LIN, " Optimum cooling system design of a free-form injection mold using an abductive



- network". Journal of Materials Processing Technology, vol. 120, pp. 226–236, June 2001. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)01193-1](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)01193-1).
- [14] I. Martin, M. Hadzistevic, J. Hodolic, "A CAD/CAE-integrated injection mold design system for plastic products". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 63, pp. 595–607. January 2012 <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3926-5>.
- [15] W. Wang, C. Zheng, F. Tang, and Y. Zhang, "A practical redesign method for functional additive manufacturing", Procedia CIRP, vol. 100, pp. 566–570, May 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.124>.
- [16] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja, and F. Martina, "Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints". CIRP Annals, vol. 65, pp. 737–760, May 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [17] 2021. *Moldex 3D*. Taiwan: CoreTech System Co., Ltd.
- [18] 2021. *MoldFlow*. Estados Unidos: Autodesk.
- [19] C. L. Li, C. G. Li, and A. C. K. Mok, "Automatic layout design of plastic injection mould cooling system". Computer-Aided Design, vol. 37, pp. 645–662, August 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2004.08.003>.
- [20] T. Matsumoto and M. Tanaka, "Optimum design of cooling lines in injection moulds by using boundary element design sensitivity analysis". Finite Elements in Analysis and Design, vol. 14, pp. 177–185, 1993. [https://doi.org/10.1016/0168-874x\(93\)90018-1](https://doi.org/10.1016/0168-874x(93)90018-1).
- [21] *Moldex3D Viewer - Moldex3D | Plastic Injection Molding Simulation Software*. (s. f.). Moldex3D | Plastic Injection Molding Simulation Software. <https://www.moldex3d.com/products/software/moldex3d/viewer/>
- [22] P. Unger, "Hot Runner Technology", Hanser Verlag: Munich, Germany, 2006. <https://doi.org/10.3139/9783446430631.fm>
- [23] P. D. Kale, P. D. Darade and A. R. Sahu, "A literature review on injection moulding process based on runner system and process variables", IOP Conference Series: Materials, science and engineering. [24] C. Fernandes, A. J. Pontes, J. C. Viana, and A. Gaspar-Cunha, "Using Multi-objective Evolutionary Algorithms for Optimization of the Cooling System in Polymer Injection Molding". International Polymer Processing, vol. 27, pp. 213–223, September 2009. <https://doi.org/10.3139/217.2511>.
- [25] K. Wilczyński and P. Narowski, "Simulation Studies on the Effect of Material Characteristics and Runners Layout Geometry on the Filling Imbalance in Geometrically Balanced Injection Molds". Polymers, vol. 11, pp. 639, April 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11040639>.
- [26] Y. Lu, K. Jiang, and M. Wang, "Study on rheological properties of in-mold co-injection self-reinforced polymer melt". Polymer Testing, vol. 93, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106910>.
- [27] B. Louhichi, G. N. Abenhaim, and A. S. Tahan, "CAD/CAE integration: updating the CAD model after a FEM analysis". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 76, pp. 391–400, August 2014. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6248-y>.
- [28] G. C. da Silva and P. C. Kaminski, "Selection of virtual and physical prototypes in the product development process". International journal of advanced manufacturing technology, Vol. 84, pp. 1513-1530, September 2015.
- [29] D. Y. Yeh, C. H. Cheng, and S. C. Hsiao, "Classification knowledge discovery in mold tooling test using decision tree algorithm". Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 22, pp. 585–595, August 2011. <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0321-7>.
- [30] C. Poli, P. Dastidar and R. Graves, "Design knowledge acquisition for DFM methodologies. Research in Engineering Design", vol. 4, pp. 131–145, 1992. <https://doi.org/10.1007/bf01607942>.
- [31] H. Öktem and D. Shinde, "Determination of Optimal Process Parameters for Plastic Injection Molding of Polymer Materials Using Multi-Objective Optimization". Journal of Materials Engineering and



Performance, vol. 30, pp. 8616-8632, August 2021.

<https://doi.org/10.1007/s11665-021-06029-z>.

[32] S. Eppinger, and K. Ulrich, "Product Design and Development" (4th ed.). McGraw-Hill/Irwin.

[33] O. R. Lazo and L. R. Rojas, "Diseño asistido por computador". *Industrial Data*, Vol. 9, pp. 7-15.

June 2016. <https://doi.org/10.15381/idata.v9i1.5709>.

[34] N. H. Naqiuddin, L. H. Saw, M. C. Yew, F. Yusof, T. C. Ng, and M. K. Yew, "Overview of micro-channel design for high heat flux application". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 901–914, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.110>.

[35] N. Gilmore, A. Hassanzadeh-Barforoushi, V. Timchenko, and C. Menictas, "Manifold configurations for uniform flow via topology

optimisation and flow visualization". *Applied Thermal Engineering*, vol. 183, October 2020 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116227>.

[36] G. Venkatesh and Y. Ravi Kumar, "Thermal Analysis for Conformal Cooling Channel". *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, pp. 2592–2598, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.113>.

[37] S. Feng, A. M. Kamat, and Y. Pei, "Design and fabrication of conformal cooling channels in molds: Review and progress updates". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 171, March 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121082>.

[38] 2021. NX 12. Estados Unidos: Siemens.

Copyright (c) 2022 Natanael González Bautista, Víctor Hugo Mercado-Lemus, Maricruz Hernández Hernández, Isaías Emmanuel Garduño Olvera, Hugo Arcos Gutiérrez



This text is protected by a license [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

You are free to Share — copy and redistribute the material in any medium or format — and Adapt the document — remix, transform, and build on the material — for any purpose, including commercial purposes, provided that you:

Attribution: You must properly credit the original work, provide a link to the license, and indicate if changes have been made. You may do so in any reasonable way, but not in any way that suggests that you endorse or receive any endorsement from Licensor for your use of the work.

[License Summary - Full License Text](#)