

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 4

ISSN: 2594-1925








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

2022  
Octubre-Diciembre



# Medición experimental de la densidad de la nube de cavitación en un Slit Venturi

## *Experimental measurement of cavitation cloud density in a Slit Venturi*

Alejandro Díaz Martínez <sup>1</sup>, Jesús Eduardo Rivera López <sup>1</sup>, José Luis Arciniega Martínez <sup>1</sup>, Carlos Alfonso Juárez Navarro <sup>1</sup>, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes <sup>1</sup>, Gabriela Esmeralda Orozco Durán <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional SEPI – ESIME. UP Azcapotzalco, Av. de las Granjas 682, Santa Catarina, Azcapotzalco, 02550 Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, ESIA Zacatenco, Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Adolfo López Mateos, Gustavo A. Madero, 07738 Ciudad de México, México.

**Autor de correspondencia:** Alejandro Díaz Martínez, Instituto Politécnico Nacional SEPI – ESIME. UP Azcapotzalco, Av. de las Granjas 682, Santa Catarina, Azcapotzalco, 02550 Ciudad de México, México, [adiazm1804@alumno.ipn.mx](mailto:adiazm1804@alumno.ipn.mx), ORCID: 0000-0002-3783-8056.

**Recibido:** 15 de Agosto del 2022

**Aceptado:** 05 de Octubre del 2022

**Publicado:** 14 de Octubre del 2022

**Resumen.** - *En el presente trabajo, se reporta la caracterización experimental de la formación y desarrollo de la nube de cavitación en diferentes temperaturas de líquido 20, 30, 40 y 50 °C. Para ello, se construyó una instalación hidráulica que tiene como elemento principal un tubo Venturi de sección rectangular, con ella, se generaron las condiciones de flujo necesarias para formar la cavitación y medir las propiedades termodinámicas para el cálculo de los números adimensionales de Thoma y Reynolds. El error promedio de sesgo de las mediciones no superó el 1%, por tal razón, se aseguró la buena calidad del cálculo en los números adimensionales de Thoma y Reynolds. Con los números de Thoma " $\sigma$ " y  $Re$  se caracterizaron las diferentes fases de la nube de cavitación, desde incipiente, cuasi, desarrollada y super cavitación en el rango de temperaturas del experimento, encontrando que el tránsito de la cavitación incipiente a desarrollada es más fácil a temperatura ambiente, ya que, el régimen de flujo aumentará solo 15.82% en comparación con las otras temperaturas. El inicio de la nube de cavitación depende de la viscosidad del fluido, en el intervalo de prueba la variación de la viscosidad fue de 55% por lo que el régimen de flujo será afectado por la viscosidad y por consiguiente en el inicio de la nube de gas. Finalmente, la densidad del fluido en el rango de temperatura de la prueba permaneció constante, ya que no vario más de 1%, por lo que no afectó al régimen de flujo.*

**Palabras Clave:** Venturi; Cavitación; Número de Thoma; Coeficiente de cavitación; Número de Reynolds.

**Abstract.** - *In the present work, the experimental characterization of the formation and development of the cavitation cloud in different liquid temperatures 20, 30, 40, and 50 °C is reported. For this, a hydraulic installation was built whose main element is a Venturi tube with a rectangular section, with it, the necessary flow conditions were generated to form cavitation and measure the thermodynamic properties for the calculation of the Thoma and Reynolds adimensional numbers. The average bias error of the measurements did not exceed 1%, for this reason, the good quality of the calculation in the Thoma and Reynolds numbers was ensured. With the numbers of Thoma " $\sigma$ " and  $Re$ , the different phases of the cavitation cloud were characterized, from incipient, quasi, developed, and supercavitation in the temperature range of the experiment, finding that the transition from incipient to developed cavitation is easier at room temperature since the flow rate will increase only 15.82% compared to the other temperatures. Finally, the density of the fluid in the temperature range of the test remained constant, since it did not vary more than 1%, so it did not affect the flow regime.*

**Keywords:** Venturi; Cavitation; Thoma Number; Cavitation coefficient; Reynolds number.

## 1. Introducción

En fluidos que se someten a incrementos de temperatura o reducción de la presión dará como resultado un cambio de fase de líquido a vapor. Convencionalmente en fluidos en reposo, la ebullición es el resultado de incrementar la temperatura a presión ambiente, mientras que, en el flujo de fluidos, la cavitación es el efecto del cambio de fase a temperatura ambiente a través de la caída de presión por debajo de la presión de vapor [1]. La formación de burbujas de vapor en el seno de un líquido se conoce con el nombre de cavitación, este fenómeno ocurre, cuando el flujo es acelerado debido a cambios abruptos en la geometría del sistema. Esta aceleración en el flujo ocasiona que la presión local en el líquido “ $P$ ” disminuya por debajo de la presión de vapor “ $P_v$ ” ( $P < P_v$ ) y, por lo tanto, el fluido cambie de fase a una temperatura constante  $T = cte$  [1-3], esta anomalía en el seno del fluido, está definida por el diagrama de fase sólido, líquido y vapor de una sustancia a diferentes temperaturas. La cavitación se presenta en múltiples sistemas ingenieriles tales como son, sistemas hidráulicos de potencia, transportes marítimos, sistemas defensa, turbinas hidráulicas, bombas centrífugas, válvulas, sistemas de inyección de combustible, sistemas aeronáuticos y aeroespaciales, etc., de tal manera que, si en el flujo se genera la cavitación desarrollada, esta tendrá efectos negativos, tales como son ruido, vibraciones, alteración del patrón de flujo, erosión y daño estructural [1-5]. Sin embargo, en algunos casos particulares, este fenómeno físico puede tener un efecto extremadamente positivo en la reducción del arrastre, como es en el caso de la súper cavitación,  $\sigma_c < 1$ , en cuerpos que se mueven naturalmente en condiciones de súper cavitación, Martin [6], en este caso, la creación de una súper cavitación ventilada alrededor de un submarino ofrece la oportunidad para incrementar la velocidad del vehículo, así como la reducción del arrastre de aproximadamente 90 % [7]. Esto hace que la cavitación sea un problema sumamente importante y complejo en

el diseño y la operación de los diversos sistemas en donde debe ser controlada y estudiada, un ejemplo de ello, se tiene con Boris [8], en donde realiza un estudio numérico de la periodicidad de la cavitación en un tubo Venturi en 2-D, y debido a la complejidad del fenómeno, acopla diversos modelos de turbulencia para poder caracterizar el comportamiento de la velocidad del flujo, la variación de la presión en la pared del tubo y las fluctuaciones de la presión.

Otros trabajos como el de Jean-Pierre [9], han demostrado que la caída de presión en el líquido está relacionada con factores de la hidrodinámica del flujo y las propiedades físicas del fluido, siendo las más importantes, geometría, esfuerzos de cortante, golpe de ariete, rugosidad de las paredes y cuerpos sólidos inmersos. La cavitación está caracterizada por el Número de Cavitación o de Thoma “ $\sigma$ ” [1, 2, 3, 10 y 11], este número adimensional es utilizado para determinar el tamaño de la cavitación, ver ecuación 1.

$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1)$$

Donde “ $P_1$ ” es la presión absoluta de referencia en Pascales, “ $P_v$ ” es la presión absoluta de vapor del líquido en Pascales, “ $\rho$ ” es la densidad del fluido en  $\text{kg/m}^3$  y “ $U$ ” es la energía cinética del flujo en m/s. De acuerdo con la magnitud de  $\sigma$  Jean-Pierre [9] clasificaron a la cavitación en incipiente y desarrollada. La cavitación incipiente es el límite entre el flujo con cavitación y sin cavitación, mientras que la cavitación desarrollada implica la permanencia y extensión de la nube de cavitación en conjunto a una caída de presión significativa. Así también, establecieron las condiciones de “no cavitación” dadas por la relación  $\sigma V > \sigma VI$ , donde “ $\sigma V$ ” es el coeficiente de cavitación a cualquier Reynolds “ $Re$ ”, y “ $\sigma VI$ ” es el coeficiente de cavitación incipiente.

Del estudio de visualización de la cavitación en un Venturi realizado por P. Tomov [10], sabemos que este trabajo experimental se realizó en tres

fases de cavitación; cavitación pura ( $\sigma = 1.71$ ), cuasi-cavitación ( $\sigma = 1.46$ ) y super-cavitación ( $\sigma = 1.26$ ), encontrando para las dos primeras fases de cavitación patrones de flujo simétricos con longitudes y frecuencias características, también encontró, que con la inyección de burbujas en la cuasi-cavitación la simetría se rompe y la estructura de las longitudes y frecuencias características son rápidamente modificadas, hasta una completa desaparición cuando la súper cavitación es alcanzada. También, Hojat [12] caracterizó el comportamiento de la cavitación, para ello, diseñó y construyó Venturis con diferentes diámetros de garganta los cuales fueron probados en condiciones de presión constante corriente arriba y presión variable corriente abajo del tubo Venturi, encontrando principalmente que el diámetro de garganta del Venturi no tiene efecto sobre el desarrollo de la cavitación, en este mismo sentido Tuasif [13] realizó un estudio numérico teniendo como base los parámetros geométricos más importantes en un Venturi relacionados con la formación, crecimiento y colapso adiabático de la cavitación, encontrando que las mejores relaciones geométricas para la generación óptima de la cavitación son  $\alpha = 2.7$  (relación perímetro-área de la garganta), relación largo ancho 1:1 y ángulo del difusor de  $5.5^\circ$  para un slit Venturi. Por otra parte, Xinping [14], realizó un estudio experimental del comportamiento dinámico global de la cavitación en un slit Venturi, en el cual pudo determinar que la cavitación ocurre a la misma relación de presiones,  $Pr = 0.89$ , y con un número de cavitación de  $\sigma = 0.99$ .

Finalmente, y por lo antes expuesto, el tubo Venturi ofrece una plataforma ideal para el estudio y el desarrollo de la cavitación y los efectos hidrodinámicos que produce, es por ello, que el objetivo de este trabajo es la caracterización experimental del patrón de flujo en diferentes regímenes de cavitación y temperatura de líquido, en un tubo Venturi de Sección Rectangular, y con ello, aportar

información relevante a este campo del conocimiento.

## 2. Marco Teórico

En el cálculo del número de cavitación, ecuación 1, se utilizó como presión de referencia la medida en la entrada del Venturi y como velocidad de referencia la medida en la garganta del Venturi, para calcular la velocidad se desarrolló la ecuación de continuidad sobre la línea de corriente central del flujo para un flujo estacionario e incompresible.

De esta manera, el número de Reynolds  $Re$ , queda:

$$Re = \frac{U(4R_h)\rho}{\mu} \quad (2)$$

Donde  $U$  es la velocidad del fluido en (m/s) en la garganta del Venturi,  $\mu$  es la viscosidad absoluta en (Pa-s),  $\rho$  es la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ), y  $R_h$  es el radio hidráulico para una sección rectangular en (m):

$$R_h = \frac{A}{PM} = \frac{LH}{2L+2H} \quad (3)$$

Donde  $PM$  es el perímetro mojado, siendo la garganta del Venturi igual a la base del rectángulo,  $L = 0.0635$  m y la altura  $H = 0.06$  m, ver figura 1.

## 3. Metodología

Para visualizar este fenómeno se empleará un diseño experimental conformado principalmente por el dispositivo presentado en la Figura 1, que consiste en un tubo Venturi fabricado por Armfield© de sección rectangular 25.00 x 6.35 cm en la entrada y 6.00 x 6.35 cm en la garganta, fabricado de perspex transparente para permitir la visualización del fenómeno de cavitación. El Venturi tiene conectado un manómetro en la entrada, el cual tiene un rango de presiones 0 a 3 bar con una resolución de 0.1 bar. También en la garganta se tiene un vacuómetro cuyo rango es de -1.0 a 0 bar con una resolución es de 0.05 bar.

Tanto el manómetro como el vacuómetro son de la marca ACTU Bideford ©.

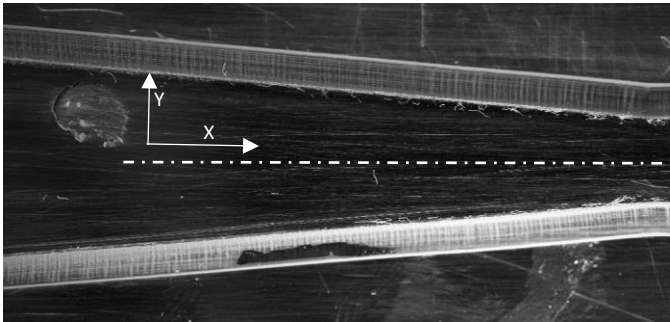


Figura 1. Slit Venturi.

En cuanto al resto de la instalación experimental se tiene una bomba centrífuga de 2 HP capaz de

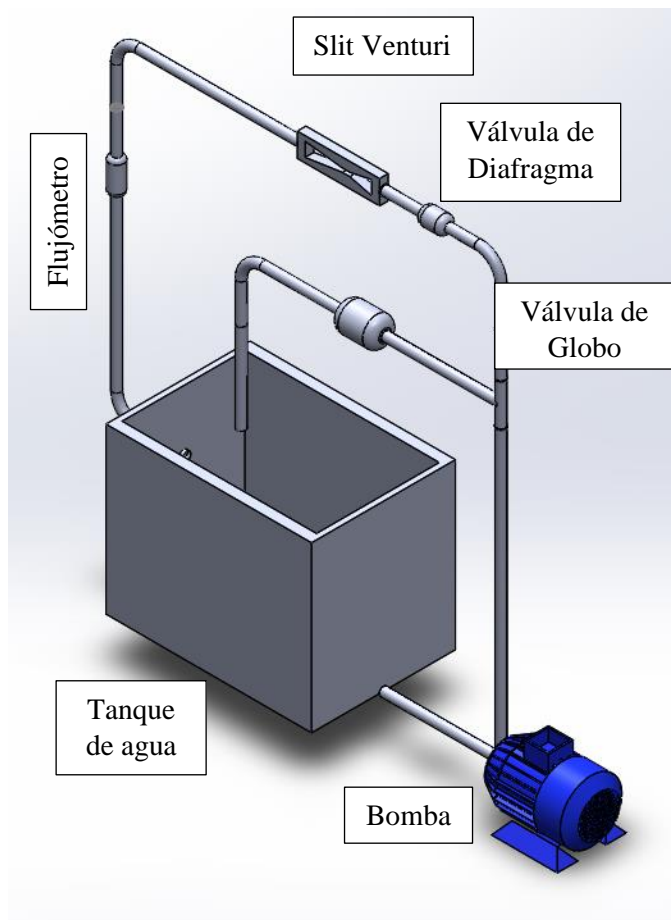


Figura 2. Esquema instalación experimental.

En la medición de flujo, se utilizó un sensor de flujo localizado a 25 diámetros nominales del Venturi para evitar la perturbación de la

manejar un flujo de 5 a 60 l/min con una carga de 5 a 60 m columna de líquido. El tanque de líquido es de 62 L en el cual se sumerge un termómetro de mercurio con un rango de  $-20$  a  $50$  °C de una resolución de  $1$  °C. Para el control de flujo se utilizó una válvula de diafragma en la descarga de la bomba, también entre la válvula de diafragma y la bomba se instaló una bifurcación al tanque controlada por una válvula de globo esto con el propósito de liberar la presión de la bomba y evitar que la válvula de diafragma cavite cuando esta se encuentre casi cerrada, ver Figura 2.

cavitación en las mediciones. El sensor de flujo es de efecto hall modelo YF-DN50 con un rango de medición de flujo 10-200 l/min. El sensor, se calibra previamente por el método de volumen, teniendo un coeficiente de  $4.2394$  l/(min-pulso). La presión atmosférica se midió por medio del sensor de presión BMP180. La adquisición de datos y programación de ambos sensores se hizo por medio de una tarjeta Arduino Uno Rev. 3 y un CPU, Intel Xeon @ 2.66 GHz con 32.0 GB en RAM.

### 3.1 Desarrollo Experimental

Las corridas experimentales se realizaron fijando la temperatura de prueba en  $20$ ,  $30$ ,  $40$  y  $50$  °C y variando el régimen de flujo por medio de la válvula de diafragma hasta alcanzar el flujo en cavitación. El fluido de trabajo fue calentado a la temperatura deseada por medio de una resistencia eléctrica, esta resistencia eléctrica es controlada por un microcontrolador Arduino y un sensor de temperatura DS18B20. El control del flujo se realizó por medio de la válvula de diafragma, esta se cierra hasta que disminuye la presión de entrada a  $0.1$  bar y se abre paulatinamente hasta llegar a la presión de  $1.1$  bar en el manómetro de entrada. Después para disminuir la presión se abre la válvula de globo, esto se hace con la finalidad de que no cavite la válvula de diafragma y no afecte las lecturas en el Venturi.

En la figura 3 se muestra la variación de las mediciones de  $P_1$  y de la presión en la garganta ( $P_{th}$ ) durante las corridas experimentales. Es importante destacar que las temperaturas

mostradas son los valores promedio y la presión atmosférica durante el experimento fue de  $P_{atm} = 587 \text{ mmHg}$ ,  $0.78 \text{ bar}$ .

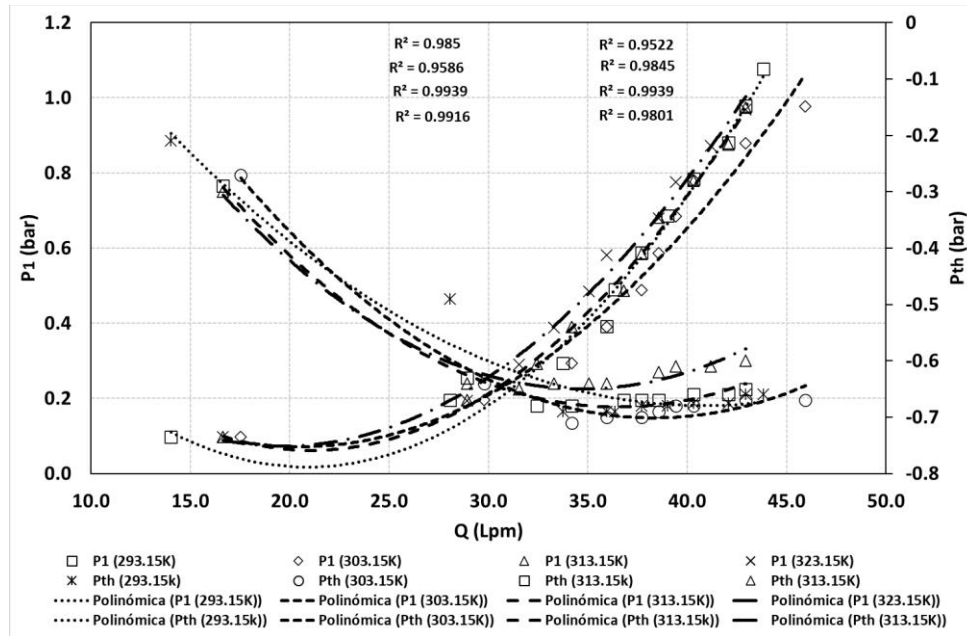


Figura 3. Mediciones experimentales,  $P_1$  y  $P_{th}$  vs  $Q$ .

De la dispersión mostrada en la figura 3 se efectuó el ajuste de los datos, teniendo una buena calidad del método de ajuste ya que  $R^2 \approx 1$ . El objetivo de realizar el ajuste de los datos experimentales es el de estimar el error promedio del sesgo experimental " $e_p$ " en cada medición efectuada, y de esta manera asegurar la buena calidad de los cálculos del coeficiente de Thoma y de la presión reducida. El error de sesgo promedio " $e_p$ " para la presión de entrada es igual a 0.036 bar, 0.044 bar, 0.089 bar y 0.021 bar, en la medición de  $P_{th}$  se estimó un error de sesgo promedio " $e_p$ " igual a 0.038 bar, 0.023 bar, 0.014 bar y 0.058 bar. Del cual, el error calculado en base a la campana de Gauss con un nivel de confianza de  $2\sigma$ , tenemos que " $e_p$ " es sumamente

bajo, ya que no supera 0.1 bar, por lo cual se puede concluir en esta primera etapa del trabajo, que las mediciones realizadas tienen la calidad suficiente para ser utilizadas para el cálculo del coeficiente de Thoma y presión reducida.

#### 4. Resultados y Discusiones

Con las mediciones experimentales se evaluará el comportamiento hidrodinámico del flujo en cavitación en la garganta del tubo Venturi. Para ello, los datos de la figura 3 son introducidos en las ecuaciones 1 y 2, para el cálculo del coeficiente de Thoma " $\sigma_c$ " y el Número de Reynolds " $Re$ ", las propiedades termodinámicas utilizadas en el cálculo se muestran en la tabla 1.



Tabla 1. Propiedades termodinámicas  $P_v$ ,  $\rho$  y  $\mu_d$ , para el cálculo de  $\sigma_c$  y  $Re$ .

$T$ (°C)	$P_v^*$ (kPa)	$\rho^*$ (kg/ $m^3$ )	$\mu_d^*$ (kg/m·s) $10^{-3}$	$\sigma_{VI}$ <i>Cavitación Incipiente</i>	$Re$	$\sigma_V$ <i>Cavitación Desarrollada</i>	$Re$	$\Delta Re$	% $\Delta Re$
20	2.339	998.0	1.002	1.3	18001	0.98	21386	3385	15.82
30	4.246	996.0	0.798	2.9	14176	1.12	24100	9924	65.89
40	9.593	992.1	0.653	3.1	16392	1.16	28471	12079	71.97
50	12.349	988.1	0.547	2.9	19492	1.09	33855	19492	76.43

\* Datos Yunus A. Cengel Termodinámica.

En la tabla también se muestra la magnitud del número de Thoma y del régimen de flujo en el cual se presenta la cavitación incipiente y desarrollada, así como el incremento y porcentaje

del flujo para transitar de la cavitación incipiente a desarrollada.

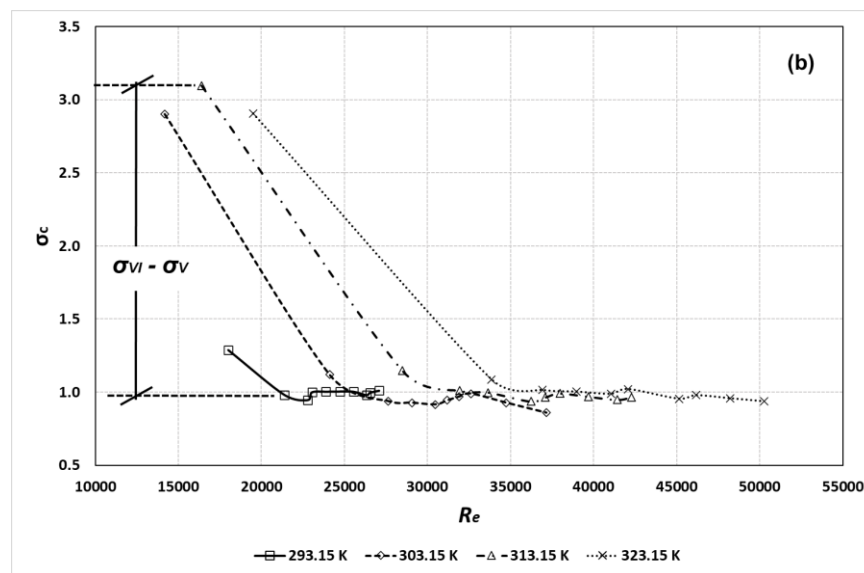


Figura 4. Desarrollo de la cavitación,  $\sigma_c$  vs  $Re$ .

La figura 4, muestra el desarrollo de la cavitación en la garganta del tubo Venturi como una función del régimen de flujo, de las temperaturas de prueba y del número de Thoma para cualquier valor de cavitación. En general, en las cuatro temperaturas se observa una región lineal en donde se desarrollan las fases de cavitación incipiente, desarrollada y súper cavitación  $\sigma_{VI} - \sigma_V$ . En las temperaturas de 30, 40 y 50 °C la cavitación inicia en incipiente y evoluciona hasta la cavitación desarrollada y llega a la súper cavitación en flujo totalmente turbulento. En la temperatura de 20 °C se tiene un régimen

totalmente turbulento con un inicio de la nube de cavitación en fase de cuasi-cavitación [10]. De lo anterior, se puede asumir que a temperatura ambiente será más fácil aumentar la densidad gde la nube de cavitación de cuasi a super-cavitación si el régimen de flujo se incrementa un 15.82%, ya que, si se compara con las otras temperaturas, el incremento en el régimen de flujo para lograr la misma densidad de la nube sería de 65.89, 71.97 y 76.43%, ver tabla 1.

Otro aspecto importante de mencionar es el inicio y por consiguiente la rapidez que tiene la nube de

gas para llegar a la super-cavitación, tiene que ver con el número de Reynolds, ya que  $Re = f(\rho, \mu)$  y la densidad y viscosidad dependen de la temperatura. De los datos de la tabla se observa que la densidad no aumentará más de 1% en el intervalo de la temperatura por lo que se considera constante, sin embargo, en el caso de la viscosidad dinámica para el mismo rango de temperatura la variación es del 55%, por lo que, si se incrementa el régimen de flujo este será más sensible a los cambios de la viscosidad dinámica. Y, por consiguiente, el desplazamiento de las curvas es debido a la viscosidad del fluido.

## 5. Conclusiones

Del estudio experimental realizado se concluye lo siguiente:

1. Con una instalación hidráulica sencilla que tiene como elemento principal un tubo Venturi de sección rectangular es posible generar condiciones de flujo para producir y medir el fenómeno de la cavitación en diferentes densidades de la nube de gas, temperatura y régimen de flujo.
2. Las mediciones realizadas durante el experimento tuvieron una buena calidad, ya que el error de sesgo promedio no fue mayor al 1%.
3. El tránsito de la cavitación incipiente a desarrollada es más fácil a temperatura ambiente, ya que, el régimen de flujo aumentará solo 15.82% en comparación con las otras temperaturas.
4. El inicio de la nube de cavitación depende de la viscosidad del fluido, en el intervalo de prueba, la variación de la viscosidad fue de 55% por lo que el régimen de flujo será afectado por la viscosidad y por consiguiente en el inicio de la nube de gas.
5. Finalmente, la densidad del fluido en el rango de temperatura de la prueba permaneció constante, ya que no vario más de 1%, por lo que, no afectó al régimen de flujo.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional por el financiamiento otorgado a los proyectos de investigación SIP 20220072 Y SIP 20221461 y en especial al Laboratorio de Ingeniería Hidráulica aplicada de la ESIME Azcapotzalco.

## 7. Reconocimiento de autoría

*Jesús Eduardo Rivera López:* Análisis de datos experimentales y redacción. *Alejandro Diaz Martínez:* Búsqueda bibliográfica y apoyo experimental. *José Luis Arciniega Martínez Corridas:* experimentales. *Carlos Alfonzo Juárez Navarro:* Diseño de la instalación experimental. *Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes:* Calibración de los instrumentos de medición. *Gabriela E. Orozco Durán:* Puesta a punto de la instalación.

## Referencias

- [1] Ki-Han Kim et Al., "Advanced Experimental and Numerical Techniques for Cavitation Erosion Prediction", Fluid Mechanics and Its Applications, Volume 106, Springer, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8539-6>
- [2] R.W., Fox, A.T., McDonald "Introduction to Fluid Mechanics", 9th. Edition, Wiley and Sons, USA. 2015 [Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics, 10th Edition | Wiley](https://www.wiley.com/foreignKey/9780470717800)
- [3] F. M., White, "Fluid Mechanics" 7th. Edition, McGraw-Hill, USA. 2009. [Fluid Mechanics \(mheducation.com\)](https://www.mheducation.com)
- [4] S., Hattori, B.H., Sun and F.G., Hammitt, "An application of bubble collapse pulse height spectra to venturi cavitation erosion of 1100-o aluminum", Wear, vol. 103, pp. 119 - 131, 1985. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90128-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90128-0)
- [5] F. Payri, R. Payri, F.J. Salvador, J. Martínez-López, "A contribution to the understanding of cavitation effects in Diesel injector nozzles through a combined experimental and computational investigation", Computers & Fluids vol. 58, pp. 88-



101, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.01.005>

[6] B., Charrière, J., Decaix, E., Goncalvès., "A comparative study of cavitation models in a Venturi flow", European Journal of Mechanics B/Fluids, vol 49, pp. 287 - 297, 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.10.003>

[7] M. Wosnik, R.E.A. Arndt, "Measurements in high void-fraction bubbly wakes created by ventilated supercavitation", J. Fluids Eng., vol 135, 2013.  
<https://doi.org/10.1115/1.4023193>

[8] S.L. Ceccio, "Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection", Ann. Rev. Fluid Mech. vol 42, pp. 183 - 203, 2010.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145504>

[9] J.P. Franc, J.M., Michel, "Fundamentals of Cavitation", Kluwer Academic Publishers, 2004.  
<https://doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>

[10] P. Tomov, S. Khelladi, F. Ravelet, C. Sarraf, F. Bakir, P. Vertenoeuil, "Experimental study of aerated cavitation in a horizontal venturi nozzle", Experimental Thermal and Fluid Science. Vol, 70, pp. 85 - 95, 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.08.018>

[11] K., Sato, K., Hachino and Y., Saito, "Inception and Dynamics of Traveling- Bubble-Type Cavitation in a Venturi", Proceedings of Asme FEDSM2003-45322, 2003.  
<https://doi.org/10.1115/FEDSM2003-45322>

[12] H. Ghassemi, H. Farshi Fasih, "Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter", Flow Measurement and Instrumentation, vol. 22, no. 5, pp. 406 - 412, 2011.  
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.05.001>

[13] T. A. Bashir, A. G. Soni, A. V. Mahulkar, A. B. Pandit, "The CFD Driven Optimisation of a Modified Venturi for Cavitation Activity", The Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 89, pp 1366 - 1375, 2011.  
<https://doi.org/10.1002/cjce.20500>

[14] X. Long, J. Zhang, J. Wang, M. Xu, Q. Lyu, B. Ji, "Experimental investigation of the global cavitation dynamic behaviour in a venturi tube with special emphasis on the cavity length variation", International Journal of Multiphase Flow, vol. 89, pp. 290 - 298, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.11.004>

Derechos de Autor (c) 2022 Alejandro Díaz Martínez, Jesús Eduardo Rivera López, José Luis Arciniega Martínez, Carlos Alfonso Juárez Navarro, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes, Gabriela Esmeralda Orozco Durán



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](#)



# Evaluación de procesos de aplicación de segunda capa para mejorar la resistencia al tallado de un recubrimiento polimérico base agua aplicado a sustratos vítricos

## *Evaluation of second layer application processes to improve the scratch resistance of a water-based polymeric coating applied to vitric substrates*

Elena Hernández Velázquez <sup>1</sup>, Daniel Gustavo Martínez Toto <sup>2</sup>, María Guadalupe Navarro Rojero <sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, Circuito de la Industria Poniente No. 11 Lote 11 Mz 3, Parque Industrial Ex Hacienda, 52004 Lerma, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Estado de México. Carretera Toluca-Atlacomulco Km 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín, 50700 Jocotitlán; Estado de México, México.

<sup>3</sup>Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, Av. Retablo 150. Col. Constituyentes Fovissste. 76150, Querétaro, Querétaro, México.

**Autor de correspondencia:** Elena Hernández Velázquez, Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, Circuito de la Industria Poniente No. 11 Lote 11 Mz 3, Parque Industrial Ex Hacienda, 52004 Lerma, Estado de México. E-mail: [ehr.velazquez@gmail.com](mailto:ehr.velazquez@gmail.com).

**Recibido:** 4 de Septiembre del 2022

**Aceptado:** 11 de Noviembre del 2022

**Publicado:** 21 de Noviembre del 2022

**Resumen.** – Tres tipos de recubrimientos fueron evaluados como medio de protección al tallado de un polímero base agua aplicado sobre una superficie vítrica. Las opciones fueron ácido oleico aplicado en fase vapor (AP5), Silano utilizando la técnica de Deposición Química de Vapor por Combustión (CCVD) y un Barniz epóxico de secado UV. Una vez aplicados, cada uno de estos materiales sobre el barniz base agua, fueron puestos en contacto con dos tipos de cartones, poli laminado y laminado a través del método de prueba Rub Tester con el equipo Sutherland 2000<sup>TM</sup> evaluando el nivel de desgaste para cada caso. Cada uno de los recubrimientos fue caracterizado antes y después de la abrasión, determinando propiedades de brillo, dureza, tensión superficial, transmitancia y lubricidad con el objetivo de conocer el nivel de efectividad de la protección al tallado de la primera capa. Los resultados muestran la mejor protección al tallado aplicando ácido oleico como segunda capa además de tener la ventaja de no afectar las propiedades estéticas del recubrimiento polimérico previo.

**Palabras clave:** Recubrimientos anti-rayado; Ácido oleico; Silano; Deposición química de vapor por combustión (CCVD); Recubrimiento de curado UV.

**Abstract.** – Three kinds of anti-scratch coatings were applied to protect a polymer water base applied on a glass surface. Oleic acid (AP5), silane by Combustion Chemical Vapor Deposition (CCVD), and lacquer by curing UV were evaluated. Each one was put in contact with two types of cardboard, laminated and poly laminated using Rub Tester Sutherland 2000<sup>TM</sup> equipment. At the end of the test, was evaluated the damage level for each sample. The coatings were evaluated both before and after applying the abrasion. Brightness, hardness, superficial tension, transmittance, and lubricity were measured in each case searching the performance level of scratch resistance and protection of the previous film. Results show that the best behavior is reached with oleic acid used as a lubricant. Also, the aesthetic properties of the first coating are not affected.

**Keywords:** Anti-scratch coating; Oleic acid; Silane; Combustion chemical vapor deposition (CCVD); UV curable coating.



## 1. Introducción

Diversos recubrimientos poliméricos son utilizados en la aplicación a envases de vidrio para brindar un color o textura adicional al producto, diversificando su uso en la industria cosmética y farmacéutica [1] [2]. De ahí radica la importancia de asegurar la resistencia y durabilidad del acabado en función del uso diario [3].

Diferentes estudios citan los esfuerzos realizados por incrementar la resistencia al tallado de recubrimientos poliméricos base agua para garantizar la calidad del producto durante su manejo, ya sea a lo largo del proceso o bien en su transporte o aplicación con el cliente final [4] [5]. Algunos de estos desarrollos parten de la necesidad de reducir el uso de embalaje utilizado para preservar el material, lo cual crea una ventana de posibilidades en la reducción de costos y la contaminación generada por los residuos de estos [6] [7].

Alternativas como la aplicación de nanotecnología al recubrimiento a través de sales de silicio o arcillas, marca un referente para no solo mejorar la resistencia al tallado [8], incluso incrementar su ángulo de contacto sin afectar el acabado superficial del mismo además de asegurar sus propiedades estéticas como son el brillo y el color [9].

En la industria de recubrimientos poliméricos aplicados a sustratos vítricos las alternativas son proyectadas a la ganancia de adherencia [10] o bien a la mejora en las propiedades estéticas del acabado final [11], sin embargo, en los últimos años se ha explorado el enfoque de mejorar la resistencia al tallado [12].

Al respecto, se han realizado diversas exploraciones a través de la modificación de la formulación polimérica para mejorar los enlaces primarios o el entrecruzamiento de los monómeros [13] [14], aunque este efecto

también ha generado la reducción de la tensión superficial del polímero, por lo que reduce la posibilidad de colocar recubrimientos posteriores.

Debido a esta limitante, los esfuerzos se han acotado al uso de recubrimientos con curado ultravioleta, ya que investigaciones citan casos de éxito mejorando la absorción de luz para incrementar el nivel de enlaces primarios no solo en la superficie, sino también en la capa que realiza el contacto con el sustrato mejorando la resistencia del recubrimiento [15].

Desarrollos científicos adicionales apuntan al uso de estos recubrimientos poliméricos de curado UV en mezcla con arcillas o silicio [16] [17], estos materiales muestran gran afinidad fortaleciendo no solo la resistencia al tallado si no también la adherencia con el sustrato, por lo que sugieren un buen campo de investigación enfocado a la aplicación en vidrio o materiales traslúcidos [18].

Por otra parte, la aplicación de ácidos grasos como agentes lubricantes trae consigo opciones alentadoras para incrementar la resistencia de polímeros a la abrasión, teniendo aplicaciones principalmente en la industria automotriz o aeroespacial [19].

La importancia de la investigación se centra en la preservación del del recubrimiento aplicado a envases vítricos desde la etapa productiva eliminando la dependencia de accesorios externos que encarecen el costo final del producto ofertado al cliente, sin alterar las propiedades estéticas, de adhesión del acabado y la compatibilidad del granel a contener.

## 2. Metodología

El desarrollo experimental fue dividido en cuatro etapas (Figura 1). La primera de ellas describe el proceso de simulación de pintado base agua sobre placas de vidrio sílice.

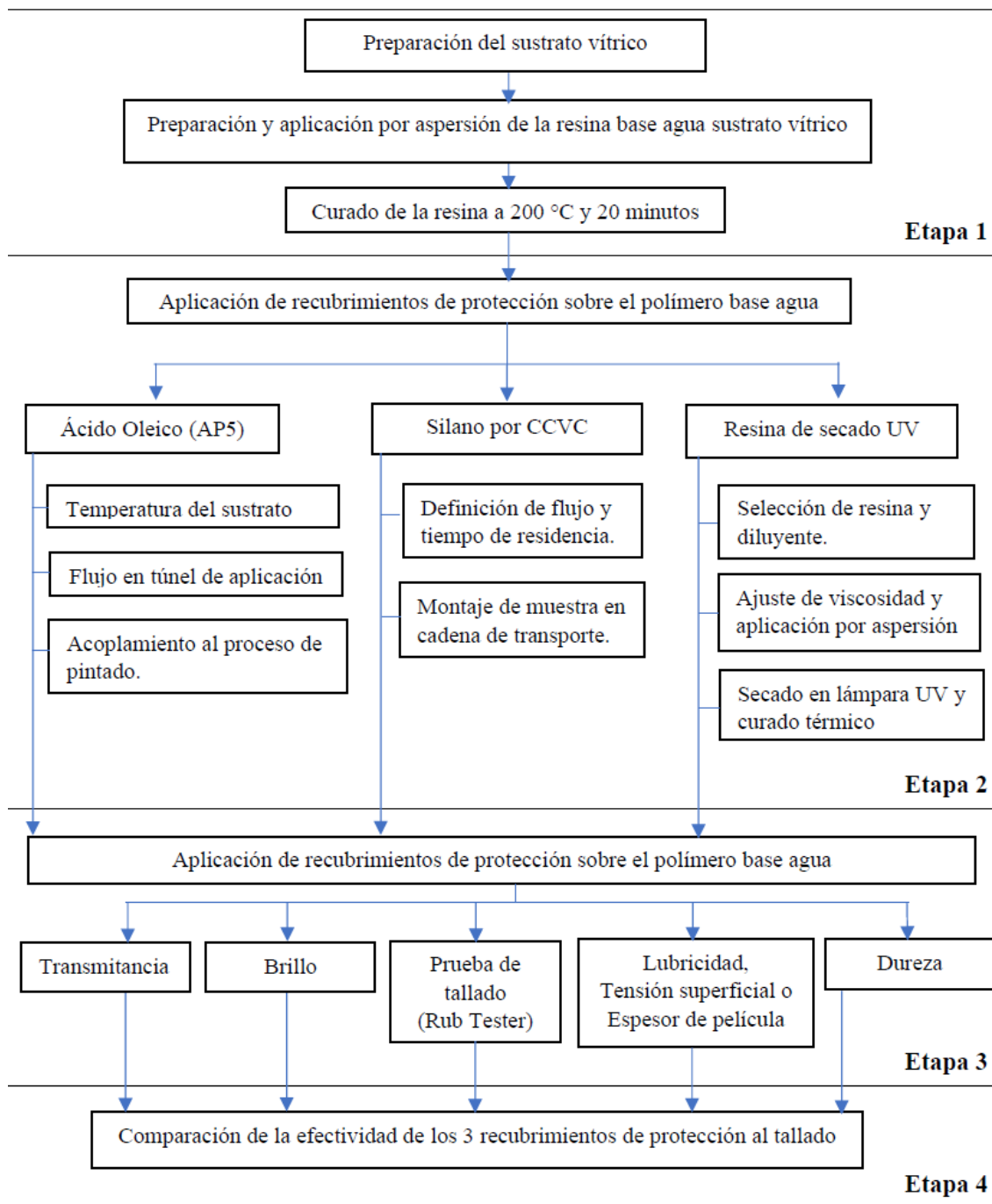


Figura 1. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.

La segunda etapa consiste en aplicar los recubrimientos que serán evaluados como medio de protección del pintado base agua, los cuales son el ácido oleico, el barniz de serigrafía UV y

silano aplicado por Deposición química de vapor por combustión (CCVD).

En la tercera etapa fueron caracterizados cada uno de los recubrimientos utilizando pruebas de



transmitancia, brillo, tensión superficial, dureza, lubricidad para el caso del ácido graso y espesor de película para el polímero de curado ultravioleta, así como la validación de la resistencia al tallado a través de equipo Sutherland 2000.

Finalmente fueron realizadas las comparaciones necesarias de cada una de las propiedades en las distintas etapas del proceso para validar una posible mejora de la resistencia al tallado y la alteración en alguna de las características inherentes del recubrimiento base agua.

### 2.1. Aplicación del recubrimiento base agua.

En esta fase fue realizado el escalamiento a nivel laboratorio del proceso de pintado por aspersión donde se utilizó Laca brillante base agua epóxica (código 250079) en combinación con su promotor de adherencia (250002) al 2% en peso y un 30% en peso de agua para ajustar la viscosidad en copa Ford 4 [20] a  $18 \pm 2$  segundos.

Posteriormente, la resina fue aplicada a la superficie de un panel de vidrio de sílice de con una pistola de aspersión de aire comprimido manteniendo un rango de presión de 60 a 80 Bares, logrando un espesor de película de 8 a 12 micras. El horneado fue realizado a temperatura de 200 °C por un lapso de 20 minutos.

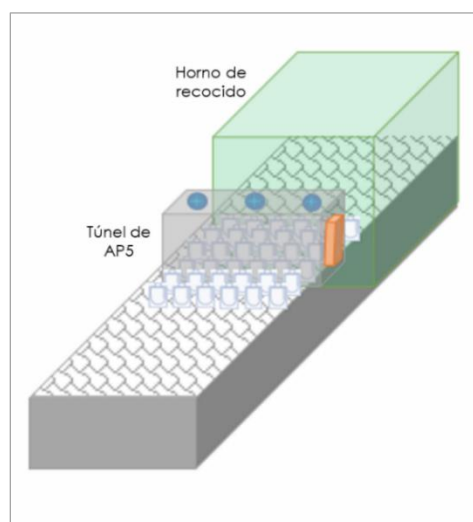
### 2.2. Aplicación de recubrimientos de protección

#### 2.2.1. Aplicación de ácido oleico (AP5) como lubricante

La finalidad de esta etapa fue transportar el método de aplicación del lubricante utilizado a la salida de los hornos de recocido de formado de vidrio, a la salida de los hornos de curado del polímero base agua (Figura 2), buscando

proteger el recubrimiento base agua de la fricción ocasionada al momento de empaquetar el producto en divisiones de cartón o bien durante su transportación al cliente y de esta manera reducir el tallado que puede sufrir el material.

El primer paso de este desarrollo fue definir el rango de aplicación de las variables críticas para transportarlas al proceso de pintado para ello, fueron consideradas, la temperatura de superficie antes de entrar al túnel de aplicación, el peso del panel de vidrio y el flujo de ácido oleico aplicado.



**Figura 2.** Diagrama de proceso de aplicación de AP5 a la salida de los hornos de recocido.

Por lo anterior, se evaluaron las temperaturas de la superficie vítrea de 26 paneles antes de ser introducidos al túnel de aplicación de ácido oleico, en donde se consideraron muestras con diferentes pesos en un rango de 147 a 206 gramos, además de realizar la documentación del flujo aplicado de AP5 ( $\text{ft}^3/\text{hora}$ ) para cada panel.

Los datos obtenidos fueron graficados, correlacionando la masa de vidrio con la temperatura de superficie y la cantidad de ácido oleico, así como la relación entre estas dos últimas.





En función de la correlación obtenida, los paneles de vidrio recubiertos con pintura base agua obtenidos de la etapa previa, fueron calentados en horno horizontal de radiación IR hasta obtener el rango de temperatura de superficie definida en la correlación de variables para asegurar la impregnación del lubricante en el túnel de AP5.

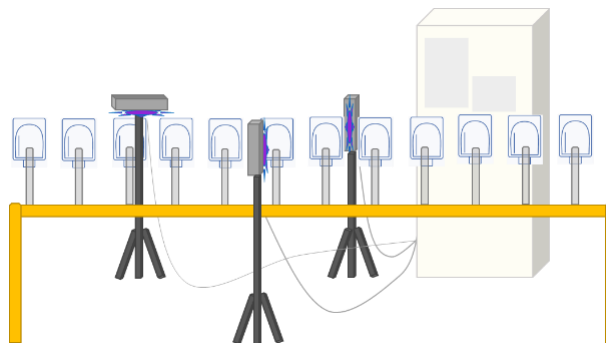
### 2.2.2. Aplicación de Silano

La deposición química en fase de vapor por combustión (CCVD) se emplea en el proceso de pintado de envases cristalinos como medio de aplicación de silano para realizar un pretratamiento al envase y asegurar la adherencia del recubrimiento polimérico base agua. Esta técnica se basa en una reacción de una mezcla de gases y compuestos inorgánicos que dan lugar a un recubrimiento sólido sobre el sustrato vítrico. La flama alcanza una temperatura mayor a 500 °C generando capas muy finas de Silano que aportan electrones libres para lograr la adherencia de la siguiente capa de recubrimiento [21].

Diversos trabajos muestran la aplicación de recubrimientos inorgánicos para mejorar sus propiedades de resistencia a la abrasión [22] [23] [24], en base a estos desarrollos se plantea utilizar el recubrimiento de silano como medio de protección al tallado para el recubrimiento base agua aplicado por aspersión.

Para la aplicación de silano fue utilizado un equipo de Arcosil® de Arcotech GmbH con voltaje de 230 V y 0.3 kVA.

Una vez aplicado el recubrimiento base agua a los paneles de vidrio, las condiciones de aplicación de silano que son utilizadas durante el pretratamiento de superficies fueron acopladas para realizar la aplicación sobre el panel pintado (Figura 3).



**Figura 3.** Aplicación de silano en cadena transportadora de pintado líquido.

Para ello, fue considerado una velocidad de aplicación de silano: 0.086 in/min, una distancia de aplicación entre el sustrato y la llama de 50 cm y un tiempo de residencia del sustrato en la flama de 4 segundos, logrando una temperatura del panel de vidrio de 45°C.

### 2.2.3. Aplicación de recubrimiento de curado UV

En el proceso de serigrafía son utilizados barnices de secado UV, que debido a su característica epóxica suelen poseer propiedades relevantes sobre la resistencia al tallado [25]. Por lo anterior, parte de la presente investigación busca utilizar este tipo de resinas como recubrimiento secundario de protección al tallado, aplicándolo ahora por aspersión a través de la modificación de su viscosidad.

La transferencia de aplicación de barniz de un proceso de serigrafía a uno por aspersión además del ajuste de viscosidad requiere la definición de variables de secado ultravioleta y el curado secundario por calor [26].

Durante el desarrollo fueron probados dos barnices para asegurar la selección de aquel que no solo garantice la protección del acabado previo, además el mayor desarrollo de transparencia y la mejor aplicación del recubrimiento. Los barnices utilizados fueron





codificados como Barniz 091 del proveedor 1 así como el Barniz 910 del proveedor 2, mientras que los endurecedores utilizados fueron el AM9192 y el UV HV8 respectivamente para cada barniz. Cada uno de estos barnices fueron diluidos con dos tipos de retardantes, el primero de ellos es el diluyente HGM4622 y el segundo, el retardante SV3 de Sefar, cada uno de ellos fueron agregados buscando reducir la viscosidad hasta un rango de  $18 \pm 2$  segundos en copa Ford 4 [20] en una relación de dilución mostrada en la tabla 1, el cual es el utilizado en la aplicación de recubrimientos por aspersión [27].

Las fórmulas obtenidas fueron aplicadas con una pistola de aspersión de la marca Startingle® a una presión de 60 Bares.

En cuanto a la definición de variables de secado, la intensidad de la lámpara fue crítico, utilizando una lámpara UV utilizada fue el modelo F600 graduable de DIMAX® calibrada con tiras reactivas fotosensibles.

La velocidad de la banda de la lámpara UV fue establecida a 73 in/min para asegurar un tiempo de exposición de 10 segundos, mientras que el porcentaje de potencia fue empleado al 85% para obtener  $400 \text{ mJ/cm}^2$  de intensidad de lámpara y así obtener el correcto secado del polímero.

Las condiciones del polimerizado secundario se establecieron de acuerdo con ficha técnica de cada proveedor, utilizando un horno de gas industrial de 7 pies de ancho con recirculación de aire superior, teniendo 12 minutos de tiempo de curado a  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  y una frecuencia de banda de 22 Hz, obteniendo una curva de curado total de 53 minutos.

### 2.3. Prueba de Rub Tester

En esta etapa fue realizada la simulación del contacto de cada uno de los recubrimientos con dos tipos de divisiones de cartón que son

utilizadas para el empaque y transporte de envases de vidrio pintado, estas fueron, la división poli laminada y la laminada. Para este propósito, fue utilizado el equipo Rub Tester Sutherland® 2000™ (Figura 4) de acuerdo con la norma ASTM D5264 [28], aplicando contacto entre el cartón a cada uno de los recubrimientos de protección (ya sea el ácido oleico, el polímero UV, el recubrimiento de silano o bien el polímero base agua que se desea proteger) durante 200 ciclos, ejerciendo un peso sobre el mismo de 0.9 Kg y una frecuencia de ciclo de 4 Hz.



**Figura 4.** Aplicación de Rub tester. a) Vista Frontal b) vista lateral aplicando el contacto con el cartón.

Durante la prueba, cada una de las muestras fue evaluada cada 10 ciclos, registrando el momento donde se comienza a observar tallado en la superficie, así como el nivel de daño obtenido al finalizar la prueba.

El nivel de tallado fue dividido en tres categorías, asignando un nivel 1 para los recubrimientos donde no se observa un daño aparente, nivel 2, para los casos donde se percibe rayas en la superficie y un nivel 3 donde se detecta desprendimiento del recubrimiento.



## 2.4. Caracterización de los recubrimientos

En esta etapa fueron determinadas las propiedades de los recubrimientos secundarios de protección (AP5, Arcosil y polímero de secado UV) así como el recubrimiento base agua primario, dichas pruebas fueron realizadas tanto antes como después de aplicar la simulación del tallado para conocer la eficiencia de la protección y si las propiedades del pintado base agua son modificadas por el segundo recubrimiento. Los parámetros evaluados fueron brillo, lubricidad, tensión superficial, dureza y transmitancia.

### 2.4.1. Lubricidad

Para determinar la cantidad de AP5 colocada en la superficie del recubrimiento base agua, fue evaluada la lubricidad utilizando una mesa de inclinación AGR®. El método de evaluación consiste en colocar tres muestras en forma piramidal sobre la mesa para posteriormente, un motor eléctrico incrementa el ángulo de inclinación de la mesa, cuando el ángulo de inclinación llega a ser tan grande que supera la fuerza de fricción entre los componentes, el componente superior se desliza y entra en contacto con la barra lateral deteniendo el motor, de esta manera se obtiene el ángulo de inclinación donde la fricción es superada, teniendo una relación directa donde a mayor ángulo, menor es la cantidad de lubricante aplicado ya que se requiere mayor fuerza para romper la atracción entre los tres componentes (Figura 5).



Figura 5. Mesa para evaluación de ángulo de lubricidad [29].

En función del método descrito, fueron evaluadas cada una de las muestras obtenidas en la aplicación de ácido oleico en fase vapor, además de la muestra con únicamente el recubrimiento polimérico base agua, calculando el diferencial de lubricidad entre ellas y confirmar la presencia del lubricante en la superficie [29].

### 2.4.2. Tensión superficial

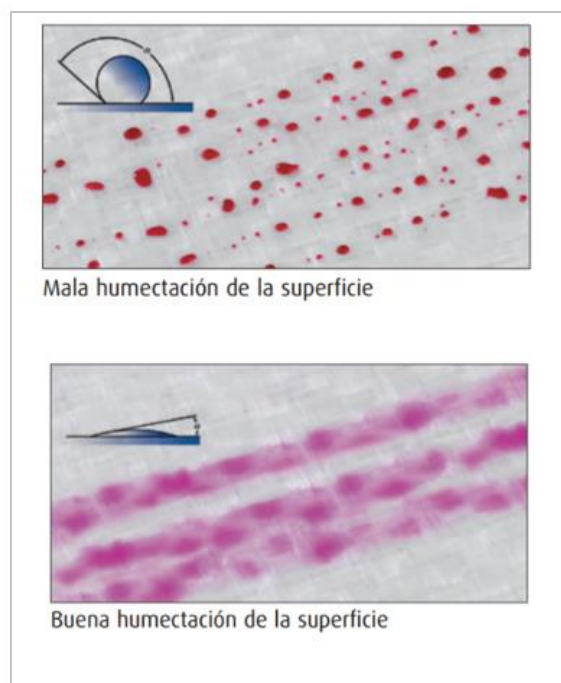
La tensión superficial fue evaluada como medio de confirmación de la presencia silano sobre el polímero base agua, ya que al cambiar el parámetro y compararlo contra su valor nominal, se puede determinar si la capa del recubrimiento de protección se encuentra sobre la superficie.

Para la realización de la prueba se usaron tintas reactivas Plasma Treat® base etanol serie C BKS01-S con un rango de 30 a 72 mN/m (Figura 6), las cuales se rigen bajo la norma ASTM D2578 [30].



**Figura 6.** Maletín de tintas de medición de tensión superficial [31].

El método consiste en aplicar la tinta de valor alto sobre la superficie buscando que el reactivo permanezca estable durante al menos dos segundos (buena humectación de la superficie), si es así, la superficie tendrá como mínimo el valor de tensión superficial marcado en el envase, de otra manera se deberá continuar con la aplicación de la tinta inmediata inferior en otra zona de la superficie hasta encontrar la que permanezca estable (Figura 7) para validación de tensión superficial [31].

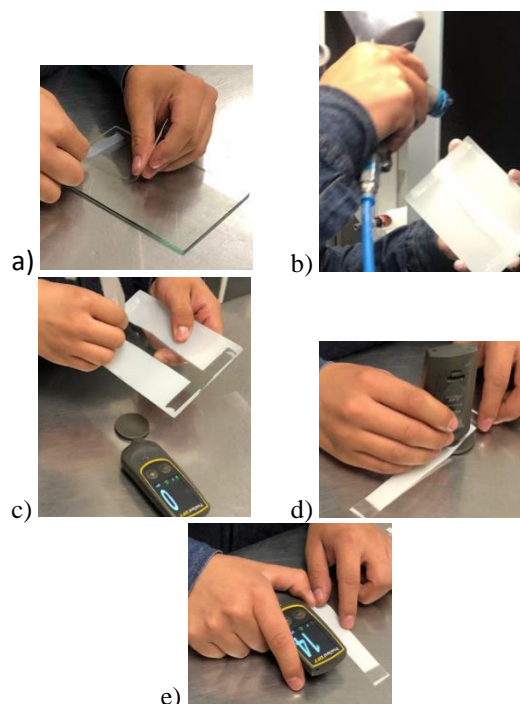


**Figura 7.** Aplicación de tintas reactivas.

### 2.4.3. Espesor de recubrimiento

El equipo utilizado para la determinación del espesor del recubrimiento polimérico de secado UV y validar la presencia del material en la superficie del polímero a proteger, fue el medidor película seca Defelsko Positest® DFT. La técnica empleada consiste en colocar una película de PET de espesor de 60 micras sobre la superficie de la placa de vidrio con recubrimiento base agua (Figura 8a).

Posteriormente, fueron aplicados a placas de vidrio cada uno de los barnices de manera independiente (Figura 8b) para después realizar el secado y curado correspondiente, al finalizar fue desprendida la película de PET (Figura 8c) y evaluada con el medidor de película seca (Figura 8d), para obtener la medición del espesor de los polímeros de secado UV, restando el espesor de la película de PET (Figura 7e).



**Figura 8.** Determinación de espesor. a) colocación película PET, b) aplicación de recubrimiento, c) desprendimiento película PET d) Medición de espesor, e) espesor del recubrimiento.



#### 2.4.4. Brillo

Para la evaluación de esta propiedad fue un brillómetro Elcometer 407 Statistical (Figura 9) utilizando el método de medición de acuerdo con la Norma ASTM D523 [32].



Figura 9. Medición de brillo en placa de vidrio.

La prueba de brillo consistió en realizar 3 mediciones sobre la superficie del recubrimiento, tanto antes como después de aplicar la simulación de tallado con el equipo Rub Tester, aplicando el método tanto a los recubrimientos de protección, como al recubrimiento primario (Figura 9).

#### 2.4.5. Dureza

En la industria de los revestimientos, la evaluación de dureza puede utilizarse para determinar la resistencia de los revestimientos al rayado.



Figura 10. Medición dureza bajo norma ASTM D3363.

El método se basa en determinar la dureza de la pintura a través de la prueba de lápices bajo la norma ASTM D3363 [33] (Figura 10), la cual consiste en rayar la película seca con lápices calibrados con dureza conocida (12B-9H) a un ángulo de 45°, asegurándose que el lápiz genere una línea de al menos 6.5mm, empezando con los niveles más suaves 12B (Figura 11) y trazando una línea por cada nivel hasta penetrar el recubrimiento, sin formar cizalladuras alrededor de la línea, el lápiz que obtenga esta calidad de penetración será el nivel de dureza del recubrimiento.



Figura 11. Escala de dureza para el método con lápices de grafito.

#### 2.4.6. Transmitancia

La evaluación de transmitancia fue realizada para conocer el porcentaje de luz que es transmitida a través de los distintos recubrimientos y por ende identificar el nivel de transparencia de cada uno de ellos. La medición fue realizada dentro del espectro visible (400-750 nm) en rangos de 50 nm mediante el uso de un espectrofotómetro UV-Vis Genesys 10s de la marca Thermo Scientific, la muestra fue colocada en el espectrofotómetro de tal manera que el haz de luz sea perpendicular a la superficie, asegurando evaluar la misma zona en cada muestra, tanto antes como después de la simulación al tallado.

### 3. Resultados

#### 3.1. Aplicación de barniz base agua

El barniz que en el presente estudio se busca proteger contra el tallado, fue caracterizado con el fin de conocer como son modificadas cada una de sus propiedades.





El material presenta una dureza 13B mientras que el brillo se muestra en 64.6 GU y el área bajo la curva de su transmitancia en el espectro visible se determinó en 42,620 unidades.

La medición de la lubricidad de las placas de vidrio con únicamente la aplicación de la laca brillante base agua obtuvieron 16° de inclinación necesaria en la prueba para poderlas deslizar. La dureza determinada para el recubrimiento fue de 13B.

### 3.1.1. Caracterización después de aplicación de Rub Tester

Una vez aplicado el contacto con cartón laminado, el brillo se reduce a 59.9 GU, mientras que el área bajo la curva de transmitancia se obtuvo un valor de 39,290 unidades.

Para el contacto con cartón poli laminado se obtienen 58 GU de brillo y el área bajo la curva de la curva de transmitancia alcanzó un valor de 40,545 unidades.

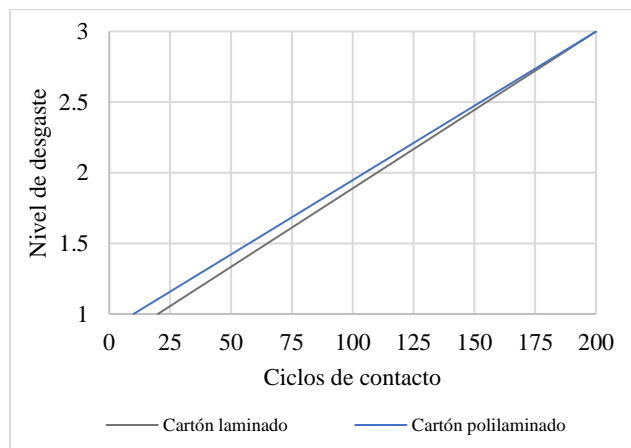


Figura 12. Resultados de prueba de Rub Tester del polímero base agua.

Para el caso del nivel de desgaste obtenido con cada tipo de cartón (Figura 12), con el cartón laminado, el desgaste se comienza a observar a partir de los 20 ciclos teniendo al final del

contacto un nivel 3 de abrasión. Para el cartón poli laminado, se observa un desgaste a partir de los 10 ciclos finalizando la prueba también con un nivel 3 de tallado.

### 3.2. Aplicación de ácido oleico sobre el polímero base agua

Mediante la recolección de datos se pronosticó la temperatura ideal del sustrato para poder aplicar el lubricante en función del peso del panel de vidrio. La correlación obtenida se muestra en el siguiente gráfico.

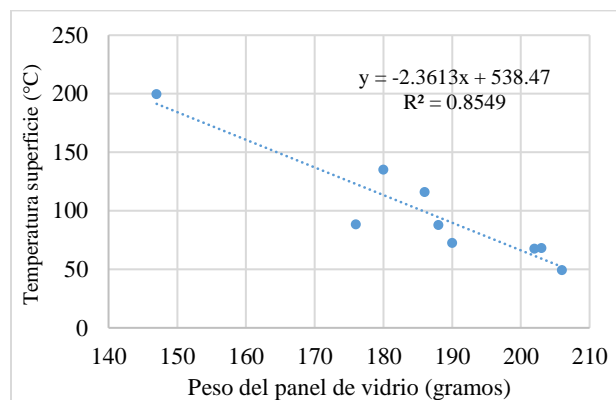


Figura 13. Gráfica de correlación de temperatura de superficie antes del túnel de AP5 contra peso del sustrato.

De acuerdo con la ecuación de la recta (Figura 13), se puede observar que la temperatura a la entrada del túnel si depende del peso del objeto que se desea lubricar confirmando que esta propiedad es crítica para mantener fuerzas en la interface que asegurar la deposición del lubricante [34], teniendo una relación inversamente proporcional entre estas dos variables, por tanto, el peso del panel de vidrio utilizado fue sustituido en la ecuación obtenida, , que en este caso fue de 189 gramos, teniendo entonces una temperatura requerida de 92 °C antes de entrar al túnel de aplicación del lubricante.



La relación entre el peso del envase y la cantidad de AP5 también fue obtenida (Figura 14), donde se observa que no hay una dependencia entre dichas variables al obtener una  $R^2$  de 0.2279, por lo que se tomó la decisión de evaluar tres diferentes flujos y determinar la cantidad óptima a través de la efectividad que se tenga de la resistencia al tallado. Por lo anterior fueron evaluados los flujos de 15, 20 y 30  $\text{ft}^3/\text{hora}$  (SCFH) de ácido oleico.

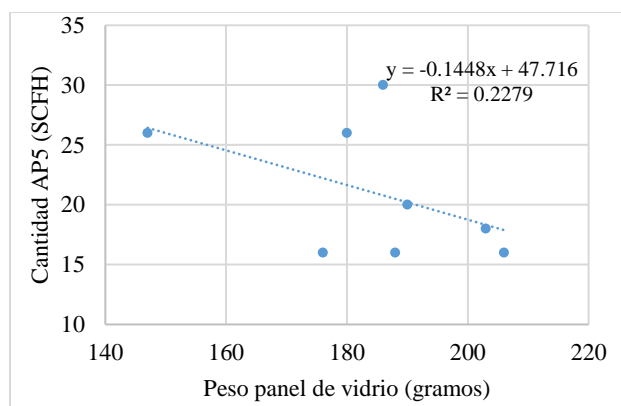


Figura 14. Grafica de correlación de flujo en el túnel de AP5 contra peso del sustrato.

Las muestras a las que se aplicó 15 SCFH de ácido oleico presentan un ángulo promedio de inclinación de  $15^\circ$ , demostrando una aplicación pobre del lubricante al tener una reducción solo del 6.3% en el ángulo de inclinación necesario para deslizar la placa de vidrio.

Por otro lado, las muestras con aplicación de 20 SCFH obtuvieron un ángulo de  $10^\circ$  confirmando un mayor espesor del lubricante sobre la superficie respecto a obtenido con un flujo de 15 SCFH.

Las placas con aplicación de 30 SCFH muestran un ángulo promedio de  $9^\circ$ , validando que esta muestra es la que contiene la mayor cantidad de lubricante.

En cuanto a la dureza, para las aplicaciones con 15 y 20 SCFH se obtuvo un valor de 10B, mientras que para la aplicación de 30 SCFH el valor de dureza se determinó en 7B.

Por lo anterior, el flujo que aporta un mayor incremento de dureza al recubrimiento base agua es el de 30  $\text{ft}^3/\text{hr}$  creciendo la dureza 7 niveles, de 13B a 7B, sin embargo, este incremento no es precisamente que el polímero base agua tenga mayor resistencia a la penetración, más bien se refiere a que al tener un lubricante en la superficie cualquier cuerpo que entre en contacto con el tendrá mayores posibilidades de deslizarse y no de penetrar, claro es que a mayor cantidad de ácido oleico, el nivel detectado de dureza es mayor [19].

El brillo para cada una de las muestras con aplicación de ácido oleico mostró un incremento significativo, teniendo 69.9 GU para el flujo de 15 SCFH, 72.9 GU para el flujo de 20 SCFH y 75.7 GU para 30 SCFH.

El área bajo la curva calculada para la transmitancia obtenida de cada recubrimiento estima un valor de 41,545 unidades para las muestras con menor cantidad de ácido oleico, 41,650 unidades para las muestras con 20 SCFH y 41,795 unidades para la aplicación con 30 SCFH.

### 3.2.1. Caracterización después de la aplicación de Rub Tester

Una vez realizado el desgaste con cartón laminado se observa una disminución de brillo para cada caso, teniendo 66.4 GU para la aplicación de ácido oleico con 15 SCFH, 70.3 GU para la aplicación con 20 SCFH y 73.3 GU para las muestras con 30 SCFH.

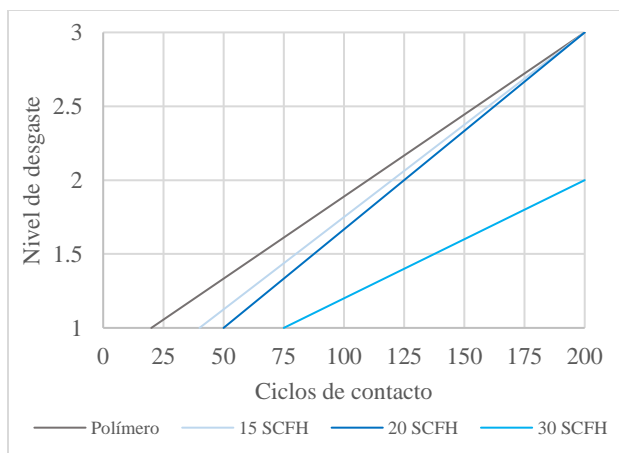




La transmitancia también presenta una reducción de área bajo la curva calculando 37,265 unidades con aplicación de 15 SCFH, 37,775 unidades para 20 SCFH y 40,365 GU para la aplicación de 30 SCFH.

En cuanto a los resultados de la prueba de Rub Tester con el cartón laminado, para las muestras donde se aplicaron 15 SCFH de ácido oleico se obtuvo un desgaste Nivel 1 a partir de los 40 ciclos, presentando a los 200 ciclos un Nivel 3 de desgaste. Para las muestras con 20 SCFH el primer desgaste es mostrado a partir de los 50 ciclos terminado con un nivel 3 a los 200 ciclos de contacto.

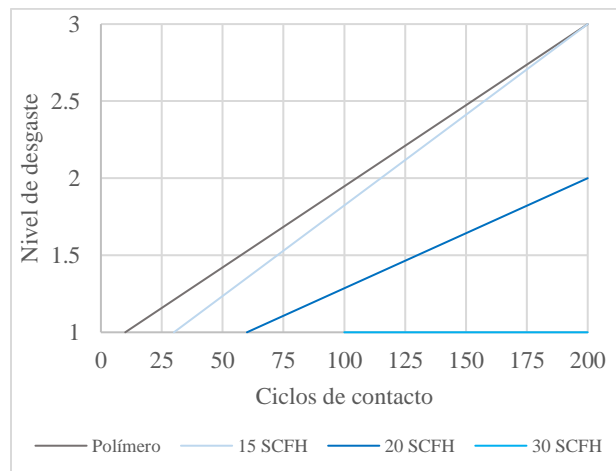
Por último, las muestras con aplicación de 30 SCFH mostraron el primer desgaste significativo a los 75 ciclos, finalizando con nivel 2 de tallado al final del contacto con el cartón (Figura 15).



**Figura 15.** Desgaste obtenido sobre el ácido oleico utilizando cartón laminado.

Para las muestras en contacto con cartón poli laminado, el brillo también se ve reducido obteniendo 58.4 GU para las muestras con 15 SFCH de flujo, 71.3 GU para las muestras con aplicación de 20 SCFH y 73.7 GU para las muestras con la mayor cantidad del lubricante.

De las áreas bajo la curva obtenidas de la medición de transmitancia, se tiene para la aplicación mínima de ácido oleico 37,695 unidades, mientras que el flujo aplicado de 20 SCFH se obtuvo 40,240 unidades, y para 30 SCFH 41,385 unidades.



**Figura 16.** Desgaste obtenido sobre el ácido oleico utilizando cartón poli laminado.

En la prueba de Rub Tester, fue observado el primer desgaste desde los 30 ciclos para la aspersión con 15 SCFH teniendo al final de la prueba un nivel 3 de desgaste. De las muestras con aplicación de 20 SCFH de lubricante el desgaste se presentó hasta los 60 ciclos finalizando la prueba con un nivel 2 y por último se tiene primer signo de abrasión a partir de los 100 ciclos para las placas con aplicación de 30 SCFH, manteniéndose en un nivel 1 de desgaste (Figura 16).

### 3.3. Aplicación de Silano sobre el polímero base agua

Para validar la aplicación de este recubrimiento, fue evaluada su tensión superficial ya que de acuerdo con estudios previos el silano tiene la capacidad de modificar esta propiedad aprovechando su cambio para favorecer la adherencia de recubrimientos secundarios [21].



Al realizar la prueba por el método de tinta reactiva [30], se obtuvo una tensión superficial de 28 mN/m para el recubrimiento polimérico base agua. Una vez aplicado el silano se volvió a evaluar la tensión, obteniendo 38 mN/m, indicando que, en efecto fue depositada la película de silano sobre el polímero.

La dureza del recubrimiento al finalizar la aplicación se obtuvo de 1B, mientras que el brillo obtenido fue de 75.6 GU y el área bajo la curva de la transmitancia en el espectro visible fue calculada en 42,800 unidades.

### 3.3.1. Caracterización después de la aplicación de Rub Tester

Al realizar le contacto con el cartón laminado el brillo se reduce a 59.1 GU y el área bajo la curva de la transmitancia a 41,960 unidades. En cuanto a la prueba de Rub Tester (Figura 17), el primer rastro de tallado fue observado desde los 25 ciclos, finalizando con un nivel 2 de desgaste a los 200 ciclos de contacto.

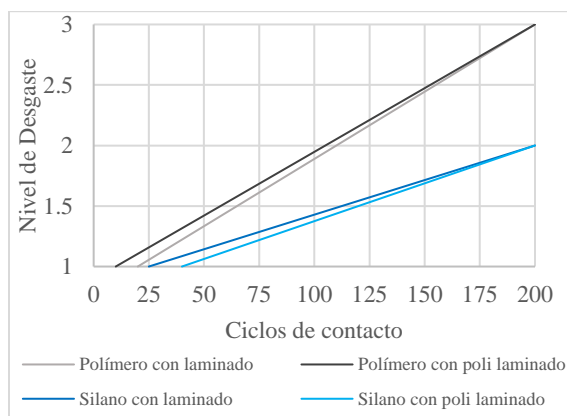


Figura 17. Desgaste obtenido sobre el recubrimiento de silano utilizando cartón laminado y polilaminado.

Para el contacto con cartón poli laminado, el brillo mostró una disminución a 71.0 GU, mientras que el área bajo la curva de la transmitancia obtuvo 42,405 unidades. Sobre la prueba de Rub Tester el desgaste inicial se

presentó a partir de los 40 ciclos, terminando la prueba con un nivel 2 de desgaste (Figura 16).

### 3.4. Aplicación de recubrimiento por curado UV sobre el polímero base agua

En este caso fue evaluado el espesor del recubrimiento de protección para comprobar su correcta aplicación sobre la superficie del polímero (Tabla 1). Los datos obtenidos demuestran la presencia del barniz de curado UV sobre la superficie del polímero, logrando el mayor grosor con el Barniz 091 diluido con AM9345 al alcanzar 7 micras de película aplicada.

Tabla 1. Espesores de película de los barnices UV aplicados.

Barniz	Diluyente	Relación Barniz-Diluyente	Espesor obtenido
091	AM9345	1.0:1.0	7 micras
091	SV3	1.0:1.3	3 micras
910	AM9345	1.0:1.1	5 micras

También se puede observar la influencia que tiene cada diluyente sobre el espesor de película, observando que la muestra que contiene el retardante SV3 generó el menor espesor de película, notando también que es el diluyente que mayor proporción guarda en mezcla con el barniz, ya que fue necesario agregar un 30% más de este material para lograr los 18±2 segundos de viscosidad de la mezcla aplicada, en comparación con la muestra donde fue utilizado el diluyente AM9345.

Por otra parte, la comparar el espesor de película entre barnices, se observa una capa 40% más gruesa con el barniz 091 que con el 910, observando que para este último fue necesario aplicar un 10% más de diluyente AM9345 para el ajuste de viscosidad.



Lo anterior demuestra que a mayor cantidad de diluyente la capa final se reduce debido a la evaporación de este en la fase de curado térmico, lo que sugiere que deberá realizarse una mayor aplicación en caso de que se busque incrementar el espesor de película [35].

Para el barniz 910 diluido con AM9345, se obtuvo una dureza 1H, un brillo de 50.8 GU y 40,675 unidades de área bajo la curva de transmitancia.

En cuanto al barniz 091 diluido con AM9345, la dureza obtenida fue 1H, 53.6 GU de brillo y 39,875 unidades de área bajo la curva de transmitancia en el espectro visible.

Para la dilución de barniz 091 y retardante SV3, el valor de dureza fue de 1F, el brillo disminuyó drásticamente a 18 GU y el cálculo del área bajo la curva de transmitancia fue de 28,295 unidades.

### 3.4.1. Caracterización después de la aplicación de Rub Tester

Al realizar el contacto con el cartón laminado, el Barniz 910 mezclado con retardante AM9345 el brillo se vio reducido a 40.3 GU y el área bajo la curva a 40,545 unidades. En la prueba de Rub Tester el primer desgaste fue observado desde los 20 ciclos terminando la prueba con un nivel 3 de abrasión.

Para el Barniz 091 diluido con AM9345 el brillo se redujo a 37.6 GU y el área bajo la curva a 39,680 unidades. Para este caso, en la prueba de Rub tester el primer signo de abrasión también se presentó desde los 20 ciclos, finalizando con un Nivel 3 de desgaste.

En la dilución de barniz 091 y retardante SV3 el brillo bajó a 14.1 GU y el área debajo de la curva de transmitancia a 30,840 unidades. En la prueba de abrasión (Figura 18), se presentó un nivel 2 de

desgaste desde los 20 ciclos, finalizando en 3 al concluir los 200 ciclos de contacto.

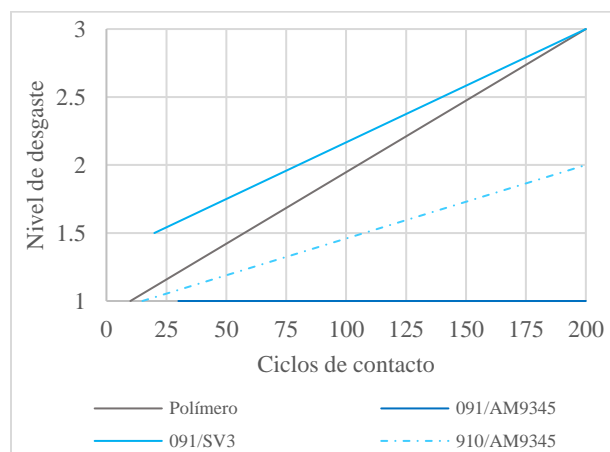
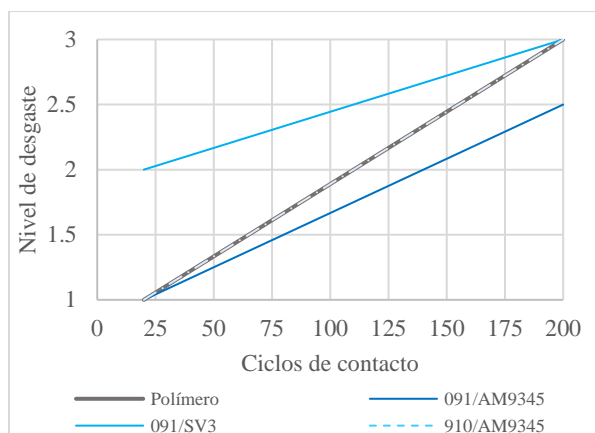


Figura 18. Desgaste obtenido sobre recubrimiento con curado UV utilizando cartón poli laminado.

En cuanto a las muestras puestas en contacto con cartón poli laminado, se observó que para el recubrimiento obtenido de la mezcla de Barniz 910 y Diluyente AM9345 el brillo se redujo a 47.5 GU y el área bajo la curva de la transmitancia fue de 40,365 unidades, mientras que la prueba de Rub Tester mostró el primer signo de abrasión desde los 20 ciclos, teniendo un nivel 2 al finalizar el contacto.

Para el recubrimiento obtenido con la dilución de Barniz 091 y Diluyente AM9345, el brillo al terminar el desgaste se redujo a 44.5 GU y el área bajo la curva de transmitancia a 39,860 GU. En la prueba de tallado el primer desgaste aparece desde los 20 ciclos, manteniendo un nivel 1 hasta el final de la prueba.

Para la mezcla de Barniz 091 y SV3, al realizar el contacto con cartón laminado, el brillo se redujo a 11.4 GU el área bajo la curva de transmitancia a 24,360 unidades. En cuanto al resultado en Rub Tester (Figura 19), un nivel 2 de tallado fue observado desde los primeros 20 ciclo/s, finalizando la prueba con Nivel 3 de desgaste.



**Figura 19.** Desgaste obtenido sobre recubrimiento con curado UV utilizando cartón laminado.

### 3.5. Comparación de la efectividad entre recubrimientos

#### 3.5.1. Dureza

El silano también aporta dureza al polímero base agua que protege, incluso más que cualquier aplicación de ácido oleico, teniendo para este caso un incremento de dureza de 12 niveles respecto a la muestra del polímero primario base agua que no tiene protección.

En cuanto a los resultados de los polímeros de curado UV, donde se observa un incremento de hasta 15 niveles en comparación con la dureza del recubrimiento base agua que se desea proteger. También se observa que no existe una diferencia significativa de dureza de acuerdo con el tipo de barniz o diluyente que se esté empleando.

#### 3.5.2. Brillo

En esta sección, se busca determinar si una segunda capa afecta el del polímero base agua tanto antes como después de sufrir abrasión a través de la prueba de Rub Tester con los dos tipos de cartones.

Una vez aplicado el ácido oleico al polímero, el brillo se incrementa en un 8% para la aplicación con 15 SFCH, 13% para la aplicación con 20 SCFH y un 17% para la aplicación con 30 SCFH, por lo que claramente se puede asumir que lubricante si se encuentra en la superficie del recubrimiento polimérico y el espesor de capa es mayor conforme el flujo de aplicación se incrementa, además de que el lubricante mejora esta propiedad del polímero.

Al realizar la prueba de Rub Tester, la versión con cartón laminado sigue conservando un brillo mayor que la muestra sin el lubricante, sin embargo, la muestra evaluada con cartón poli laminado resulta con una disminución de brillo en un 10%, igualando los datos que se obtuvieron en las muestras que no contienen ningún tipo de recubrimiento secundario, sugiriendo que la cantidad de ácido oleico aplicado para estas muestras es insuficiente y por tanto la protección al tallado no es eficiente.

Por otro lado, al someter a la abrasión las muestras con aplicación de 20 SCFH, continuaron mostrando un aumento de brillo comparándola con la muestra con solo el recubrimiento primario base agua, situándose en un incremento del 10%, este resultado se presenta al utilizar ambos cartones.

Para el caso de las muestras con la mayor aplicación de ácido oleico (30 SCFH), se obtuvo un incremento de brillo del 17%, adicional al aplicar tallado tanto con el cartón laminado como poli laminado, el incremento de brillo solo se ve reducido a un 13.5 y 14% respectivamente.

En cuanto al recubrimiento de silano, si bien hay un incremento de brillo por la aplicación de esta capa y se alcanzan niveles superiores a 70 GU, al realizar el tallado con cartón laminado, se tiene una disminución incluso mayor que la del barniz por sí solo, bajando de 76 a 59 GU, sin embargo,



la abrasión con cartón poli laminado muestra un buen comportamiento al solo reducir el brillo en un 6% y mantenerse por encima del valor del polímero primario base agua.

Para el comportamiento de los polímeros de curado UV, donde desde la evaluación de la capa previo al tallado se ve un desempeño pobre de brillo, teniendo un valor máximo de 50 GU para el barniz 091 que fue diluido con AM9345, reduciendo el valor de la primera capa del polímero base agua en un 21%. El peor desempeño se observa con la dilución del barniz 091 en SV3, ya que se tiene una pérdida de brillo de un 72% con la aplicación de este recubrimiento de protección.

En cuanto a los resultados obtenidos posteriores a la prueba de Rub Tester, para este tipo de

recubrimientos de curado ultravioleta, se observa una disminución de brillo desde un 20 hasta un 37%, siendo la más significativa en la muestra donde fue aplicada la dilución con SV3 y sometida a prueba de tallado con división poli laminada. Teniendo así los resultados de brillo más pobres de todos los recubrimientos evaluados.

### 3.5.3. Transmitancia

La transmitancia arrojó resultados para conocer el comportamiento de la transparencia y color del recubrimiento, tanto al aplicar el material de protección sobre el polímero base agua como al someterlo a la abrasión con los dos tipos de cartones.

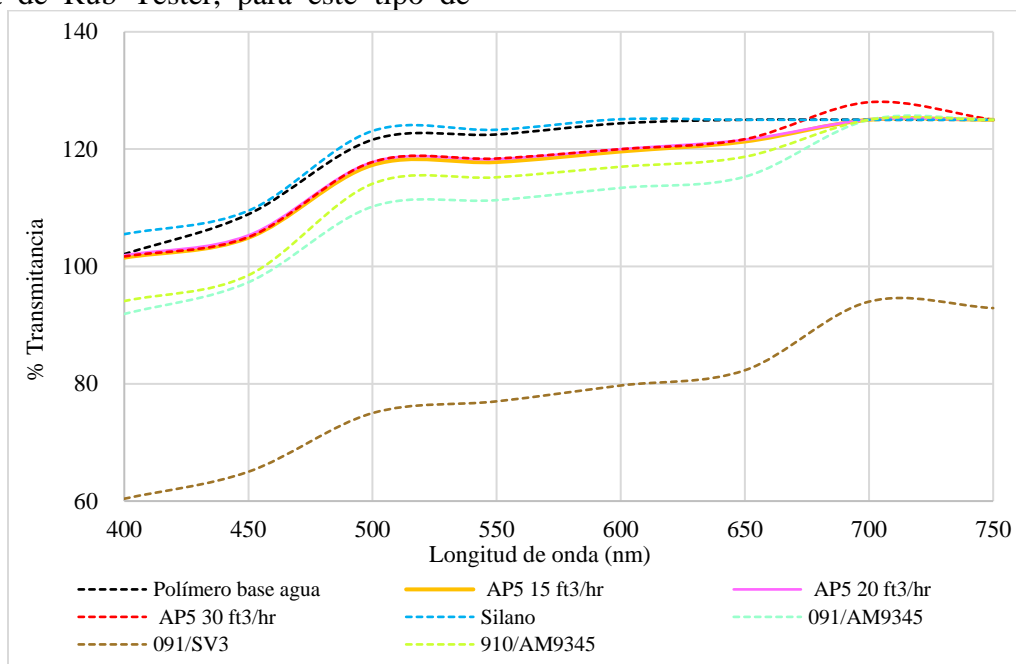


Figura 20. Curva de transmitancia en el espectro visible de los recubrimientos aplicados.

En primera instancia se muestra en la Figura 20 el comparativo entre el recubrimiento polimérico base agua y su comportamiento al tener en la superficie un segundo recubrimiento. De ahí, obteniendo las áreas bajo la curva de cada aplicación y comparándolas contra la del

polímero base agua, se observa que la transmitancia se reduce en 2.5% para la aplicación con 15 SCFH de ácido oleico, 2.3% para la de 20 SCFH y 1.9% para el caso de la aplicación de 30 SCFH.



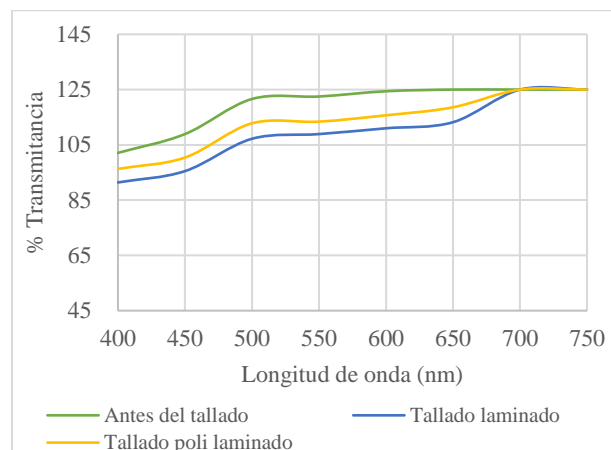
En cuanto al silano se observa un comportamiento prácticamente idéntico al del polímero, mostrando una diferencia entre áreas de solo el 0.4%, esto se debe probablemente al tamaño de partícula del silano, ya que, de acuerdo con estudios previos [9], se tienen partículas nanométricas depositadas en la superficie que no interfieren con la longitud de onda de espectro visible.

El comportamiento de los tres diferentes barnices probados donde se observa la mayor diferencia de transmitancia, obteniendo para la mezcla de Barniz 091 con diluyente AM9345 una reducción del 6.4%, para la mezcla del Barniz 910 y AM9345 4.6% y para la dilución de Barniz 091 con SV3 se obtuvo del 33.6%, siendo este recubrimiento el que mayor pérdida de transparencia genera.

En cuanto a la afectación del color del recubrimiento de protección, se observa que todas las curvas mantienen la misma tendencia del polímero base agua, por lo que se puede estimar que este parámetro no sufre cambio para ninguno de los recubrimientos aplicados.

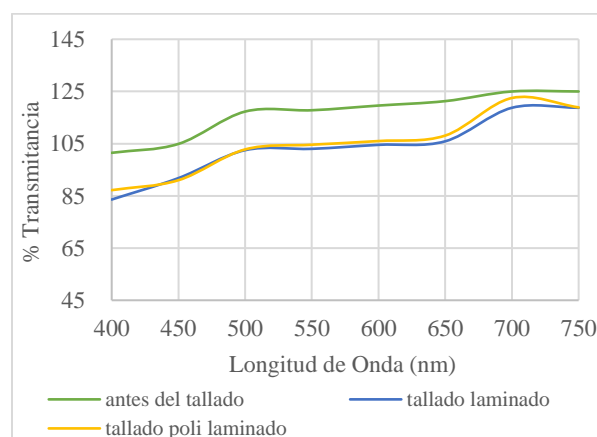
Como segunda fase del análisis de transmitancia, se realizó el comparativo de curvas de cada recubrimiento tanto antes como después de sufrir la abrasión con los dos tipos de cartón empleados, con el objetivo de cuantificar el grado de desgaste a través de la pérdida de la transparencia del material. De acuerdo con lo anterior, fueron comparadas las áreas bajo las curvas teniendo los siguientes resultados.

Para la aplicación del polímero base agua (Figura 21), se obtuvo una disminución de transparencia del 7.8% al aplicar tallado con cartón laminado y 4.9% con poli laminado.



**Figura 21.** Curvas de transmitancia del polímero base agua.

El ácido oleico (AP5) con 15 SCFH la reducción de transparencia se sitúa en un 10.3% para el laminado y un 9.27% para el poli laminado. Al ser mayor la transparencia que la obtenida para el polímero base agua, se deduce que el recubrimiento no es constante en toda la superficie, generando rugosidad en la misma, lo que contribuye a un mayor desgaste del polímero además de que, al someterse a un calentamiento previo se puede inferir que este debilita los enlaces del polímero provocando mayor sensibilidad a la abrasión (Figura 22).



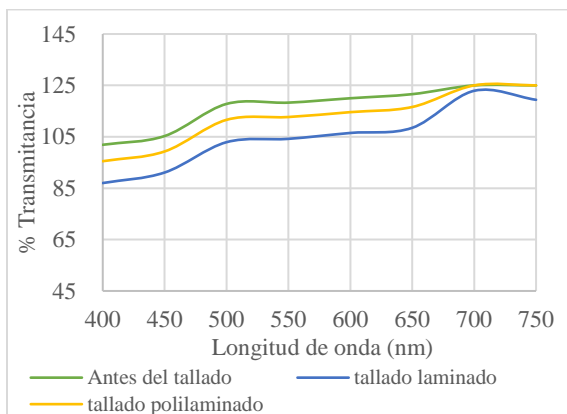
**Figura 22.** Curvas de transmitancia de aplicación de ácido oleico con 15 SCFH.

En cuanto a la aplicación de 20 ft<sup>3</sup>/hr una reducción de transmitancia del 9.30% para el



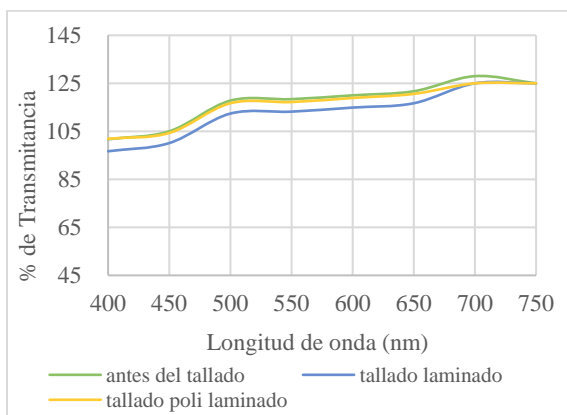


empaque laminado y 3.39% para el poli laminado, mostrando una mejora del 30.5% para este último caso en comparación con el resultado del polímero base agua, sin embargo, para el cartón laminado se obtiene todavía mayor desgaste, sugiriendo que aún la cantidad aplicada de ácido oleico es insuficiente para proteger la superficie del polímero (Figura 23).



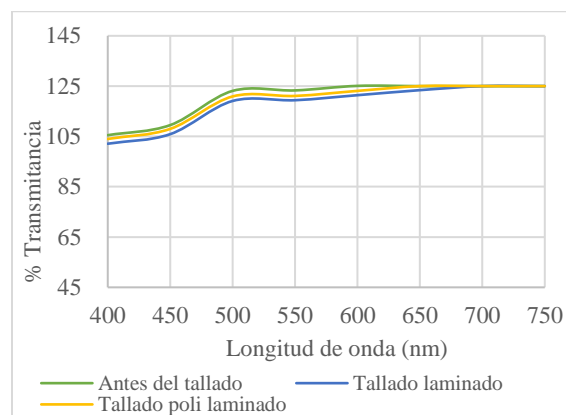
**Figura 23.** Curvas de transmitancia de aplicación de ácido oleico con 20 SCFH.

En la aplicación con un flujo de ácido oleico de 30 SCFH (Figura 24), la reducción de transmitancia al aplicar el tallado se logra aminorar significativamente, teniendo solo el 3.42% de pérdida con el cartón laminado y el 0.98% con el poli laminado, igualando prácticamente para este último caso la trayectoria de la curva antes de sufrir el tallado.



**Figura 24.** Curvas de transmitancia de aplicación de ácido oleico con 30 SCFH.

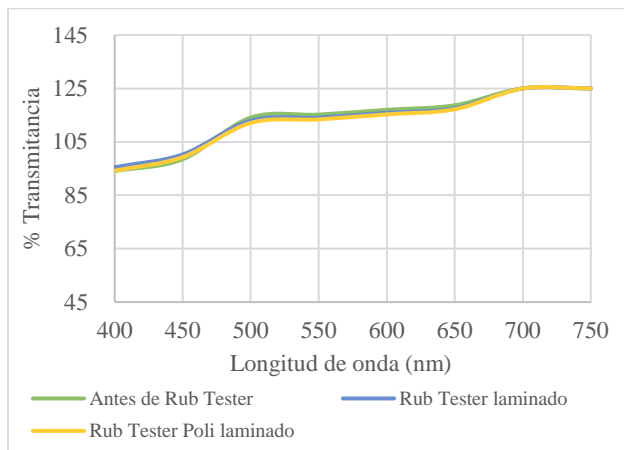
Para el caso, de las muestras con aplicación de silano, la mejora también fue significativa, reduciendo solamente la transmitancia en un 1.96% al utilizar cartón laminado y el 0.92% con el cartón poli laminado, de manera adicional, se observa que la diferencia de abrasión entre cartones es mínima, igualando prácticamente para ambos casos la curva del recubrimiento antes de sufrir el desgaste (Figura 25).



**Figura 25.** Curvas de transmitancia de aplicación de Silano.

En el caso donde fue utilizado un polímero de curado UV como recubrimiento secundario, donde analizando las dos mezclas que menor pérdida de transparencia mostraron, es decir la del Barniz 091 y el Barniz 910 ambos con diluyente AM9345.

Para las muestras donde fue empleado el Barniz 910 en mezcla con AM9345 (Figura 26) se obtuvo una reducción de transmitancia del 0.32% y 0.76% para cartón laminado y poli laminado respectivamente, en tanto, se observa solo una pérdida de transmitancia de 0.49% y 0.04% para las muestras de Barniz 091 mezclado con diluyente AM9345 y sometido a Rub Tester con cartón laminado y poli laminado respectivamente (Figura 27), siendo este último recubrimiento el que menor diferencia de transparencia presenta después de someterse al tallado.



**Figura 26.** Curvas de transmitancia de aplicación de Barniz 910 y diluyente AM9345.



**Figura 27.** Curvas de transmitancia de aplicación de Barniz 091 y diluyente AM9345.



**Figura 28.** Curvas de transmitancia de aplicación de Barniz 091 y diluyente SV3.

La curva de transmitancia del Barniz 091 diluido con SV3 (Figura 28) muestra la menor transparencia obtenida de todos los recubrimientos la cual, en longitudes de onda debajo de 550 nm se sitúa debajo del 85% lo que demuestra un recubrimiento con baja transparencia, por lo que fue descartado su uso.

### 3.5.4. Evaluación del tallado mediante Rub Tester

Para el caso de las muestras que fueron sometidas a lubricación de ácido oleico y puestas en contacto con cartón laminado se observa que con un flujo de 15 y 20 SCFH, aun cuando el tallado comienza a presentarse a los 20 y 30 ciclos posteriores al que presenta el recubrimiento sin protección, al final del contacto, el nivel obtenido se mantiene en 3. En cuanto al flujo de 30 SCFH el primer desgaste se observa hasta los 80 ciclos, mejorando la resistencia en comparación con el recubrimiento sin protección que presenta los primeros signos de abrasión desde los 20 ciclos, adicionalmente, al final de la prueba el material muestra una reducción de nivel 3 a 2, mostrando una mejora en su resistencia al desgaste.

Para las muestras puestas en contacto con cartón poli laminado, particularmente las que contienen una aplicación de 15 SCFH el resultado es similar al presentado con el cartón laminado, sin embargo, a partir de la muestra con 20 SCFH la mejora es más significativa, teniendo para esta muestra un incremento de 10 a 60 ciclos del primer rastro de tallado además de reducir el nivel de desgaste de un nivel 3 a 2 al final de la prueba. Para las muestras con 30 SCFH el primer desgaste se presenta hasta el ciclo 100, manteniendo un nivel 1 hasta el final de la prueba

Para el caso de las muestras que se les aplicó silano, el contacto con ambos tipos de cartones, presenta un tallado se ve reducido de 3 a 2 mientras que el inicio del desgaste solo se



observa una mejora en la muestra que fue sometida a contacto con cartón poli laminado, migrando del ciclo 10 al 40.

Las muestras con polímeros de curado UV, donde la dilución de barniz 910 con SV3 mostró incluso un mayor desgaste con ambos cartones que la muestra de polímero base agua sin recubrimiento de protección, esto muestra relación con el espesor obtenido de este recubrimiento, ya que se obtuvo una película pobre de solo 3 micras que supone la formación de una superficie rugosa y por tanto más susceptible a la abrasión.

En cuanto a la muestra que se le aplicó el barniz 910 diluido con AM9345 sometida a abrasión con cartón laminado, presentó un comportamiento idéntico que la muestra sin recubrimiento, por lo que para este caso no se observa que exista una protección al tallado. Cabe mencionar que, de este mismo recubrimiento al someterlo a la abrasión con cartón poli laminado se observa una mejora en el nivel de tallado al final de la prueba, reduciendo de un nivel 3 a un 2.

Este comportamiento está relacionado con el espesor del recubrimiento, ya que el barniz 910 desarrolló un grosor mayor al diluirlo con AM9345 que con SV3 (Tabla 1), este espesor mayor asegura mayor cantidad de material depositado, eliminando la generación de crestas y valles en el superficie y por ende una aplicación menos rugosa, lo que aminora la superficie de contacto y la abrasión entre superficies así como el desprendimiento y desgaste del material al entrar en contacto con el cartón menos rugoso, que en este caso es el poli laminado.

De las muestras de barniz 091 diluido con AM9345, se observa una mejora con ambos tipos de cartones, haciéndose más evidente con el poli laminado, ya que el nivel 1 de tallado permanece

desde los 20 ciclos y hasta el final de la prueba mostrando una relación directa con el espesor de película fijado, ya que de las tres muestras de barniz que se aplicaron, este es el que mayor grosor obtuvo.

#### 4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados mostrados, se observa que los mejores recubrimientos que contribuyen a la reducción del tallado al contacto con distintos cartones son, el ácido oleico (AP5) a un flujo de 30 SCFH y el Silano.

Para la aplicación de AP5, la propiedad que mayormente se beneficia es el brillo del recubrimiento, incluso mejora el valor inicial del polímero base agua antes de aplicar el recubrimiento de protección, incrementando en un 17%.

El nivel de desgaste muestra gran significancia, al aplicar abrasión con ambos cartones, se observa tallado hasta después de los 75 ciclos en contacto manteniéndose en Nivel 1 hasta el término de la prueba.

En cuanto a la película de silano, mostró excelentes resultados en transmitancia de luz al modificar en menos el 1% la curva en el espectro visible posterior a su aplicación. La dureza presenta de los mejores incrementos mostrados con cualquier recubrimiento, al incrementar de un nivel de 13B a 1B en la prueba del lápiz.

El desgaste mostrado después de sufrir abrasión aparece después de los 40 ciclos en contacto alcanzando solo un nivel 2 al final de la prueba.

Con los resultados obtenidos en el presente proyecto se proporcionan dos recubrimientos capaces de reducir el desgaste de polímeros base agua y por tanto aumentar su tiempo de vida.



Existen áreas de oportunidad en la aplicación de ácido oleico, teniendo resultados conservadores en la prueba de Dureza, siendo este material el que menor incremento mostró.

Para el silano el resultado que presenta área una mejora reducida es el brillo, siendo afectado en un 22% al terminar el contacto con el cartón laminado, por lo que será recomendable buscar un mayor espesor del recubrimiento para reducir el impacto del desgaste con este cartón.

Tanto el ácido oleico como el silano son materiales comúnmente utilizados en la industria de los recubrimientos que abren la ventana de posibilidades de utilizar la infraestructura con la que se cuenta en el sector para tener doble aplicabilidad y optimizar los procesos productivos, además de reducir el uso de materiales de embalaje complejos con bajo potencial de reciclado que son utilizados actualmente para la protección de los polímeros.

Finalmente, se obtiene una ventana de investigaciones para estudiar el impacto de estos materiales de protección sobre polímeros mate base agua que son altamente rugosos y con mayor tendencia a la abrasión o bien, polímeros pigmentados para detectar si existe alguna alteración en el color del recubrimiento o incluso un mayor desgaste.

Otro factor para analizar en desarrollos posteriores es la degradación de cada uno de los materiales de protección al contacto con temperaturas ambientales, humedad y rayos UV para determinar el tiempo de vida del material una vez aplicado.

## 5. Reconocimiento de autoría

*Elena Hernández:* Conceptualización, Metodología, Investigación, Escritura: revisión y

edición, visualización, supervisión y administración del proyecto. *Daniel Gustavo Martínez Toto:* Análisis Formal, Investigación, Curación de datos, Escritura-borrador original. *María Guadalupe Navarro Rojero:* Validación y supervisión.

## Referencias

- [1] M. E. Kamen y H. Ming, «Glass decorating method using bis phenol-A epoxy resins and related compositions and articles». Patente 735181, 2001. [JP2000507281A - Glass decorating method using bisphenol A epoxy resin and related compositions and articles - Google Patents](#)
- [2] T. J. Hart, R. B. Hodek, N. Louis J., T. Robert H. y Z. Yingchao C., «Method and compositions for improving durability of coated or decorated ceramic substrates». USA Patente US 20050069714A1, 31 Marzo 2005. [US20050069714A1 - Method and compositions for improving durability of coated or decorated ceramic substrates - Google Patents](#)
- [3] R. Siebenlist, G. Eisen y L. Hoekman, «Scratch Masking Coating for glass containers». USA Patente US 20090208657A1, 20 Agosto 2009. [US20090208657A1 - Scratch masking coating for glass containers - Google Patents](#)
- [4] R. G. La Casse y W. S. Creasy, «Scratch-Resistant Anti-fog coating composition incorporating isocyanate-reactive surfactants». Patente 5,877,254, 1999. [US20090208657A1 - Scratch masking coating for glass containers - Google Patents](#)
- [5] S. Oblon, M. McClelland y P. Neustadt, «Method for deposition of an anti-scratch coating». Patente US 2009/0017314 A1, 2009.



- [6] H. J. Fleck, «Scratchproof silicone coating for cooking plates made of glass or glass ceramics». Francia Patente EP 2 243 752 B1, 2012. [EP2243752B1](#) - [Kratzfeste Silikonbeschichtung für Kochflächen aus Glas oder Glaskeramik - Google Patents](#)
- [7] J. R. Schneider, D. D. Ragan, K. S. Rechenberg, A. M. Chasser y K. A. Barkac, «Composiciones de revestimiento en polvo curables que proporcionan resistencia mejorada al rayado y a la abrasión y procedimiento de uso de las mismas». España Patente EP 1345999, 13 Abril 2016. [EP1345999B1](#) - [Härtbare pulverbeschichtungszusammensetzungen mit verbesserter kratzfestigkeit und verfahren zur verwendung derselben - Google Patents](#)
- [8] S. Mohamadpour, B. Pourabbas y P. Fabbri, «Anti-scratch and adhesion properties of photo-curable polymer/clay nanocomposite coatings based on methacrylate monomers,» Scientia Iranica, vol. 18, n° 3, pp. 765-771, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.06.001>
- [9] L. Z. Y. H. y. C. L. Yun Wang, «Comparative Study on Optical Properties and Scratch Resistance of Nanocomposite Coatings Incorporated with Flame Spray Pyrolyzied Silica Modified via in-situ Route and ex-situ Route,» Journal of Materials Science and Technology, pp. 251-258, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.11.008>
- [10] C. Pankiewicz, T. Duraisamy, B. Gardner, I. Dudas, D. C. Kapp, E. A. Axtell y G. E. Sakoske, «Materials for Improved adhesion relating to functional cold en coatings (CECs) and methods of detecting same». Patente WO 2011/102936 A1, 2011. [US20130040392A1](#) - [Materials for Improved Adhesion Relating to Functional Cold End Coatings \(CECs\) and Methods of Detecting Same - Google Patents](#)
- [11] S. Lv, W. Zhou, H. Miao y W. Shi, «Preparation and properties of polymer/LDH nanocomposite used for UV curing coatings,» Progress in Organic Coatings, vol. 65, pp. 450-456, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2009.04.001>
- [12] L. G. Anderson, K. A. Barkac, S. A. Desaw, M. E. Hartman, D. E. Hayes, T. R. Hockswender, K. L. Kuster, G. J. Maccollum y M. Nakajima, «Coating Compositions having improved scratch resistance, coated substrates and methods related thereto». Patente WO 01/09259 A1, 2000. [WO2001009259A1](#) - [Coating compositions having improved scratch resistance, coated substrates and methods related thereto - Google Patents](#)
- [13] K. Su y D. Makita, «Protective Coatings and methods of applying and using the same». USA Patente US 20040106707A1 , 3 June 2004. [US20040106707A1](#) - [Protective coatings and methods of applying and using the same - Google Patents](#)
- [14] S. Lehmann y W. Schaefer, «Glass Printing ink or lacquer of epoxy resin, other resin and photoinitiator». Patente US008501876B2, 2004. [US8916656B2](#) - [UV hardening glass printing ink and UV hardening glass printing lacquer and method for printing a glass substrate - Google Patents](#)
- [15] A. M. E. A. Dawid Prządka, «POSS-modified UV-curable coatings with improved scratch hardness and hydrophobicity,» Progress in Organic Coatings, p. 8, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.09.007>
- [16] L. Fogelström, E. Malmström, M. Johansson y A. Hult, «Hard and Flexible Nanocomposite Coatings using Nanoclay-Filled Hyperbranched Ppolymers,» Applied materials





& Interfaces, vol. 2, n° 6, pp. 1679-1684, 2010. <https://doi.org/10.1021/am1001986>

[17] E. Petrovicova, R. Knight, L. S. Schadler y T. E. Twardowsk, «Nylon 11/Silica Nanocomposite coatings applied by the HVOF process. II. Mechanical and barrier properties,» Journal of Applied Polymer Science, vol. 78, pp. 2272-2289, 2000. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20001220\)78:13<2272::AID-APP50>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20001220)78:13<2272::AID-APP50>3.0.CO;2-U)

[18] E. Barna, B. Bommer, J. Kürsteiner, A. Vital, O. v. Trzebiatowski, W. Koch, B. Schmid y T. Graule, «Innovative, scratch proof nanocomposites for clear coatings,» Composites Part A: applied science and manufacturing, vol. 36, pp. 473-480, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.10.014>

[19] S. Rajput, V. Gite, P. Mahulikar, V. Thamke, K. Kodam y A. Kuwar, «Renewable Source Based Non-biodegradable Polyurethane Coatings from Polyesteramide Prepared in One-Pot Using Oleic Acid,» Journal of the American Oil Chemists' Society, vol. 91, n° 6, pp. 1055-1063, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2428-z>

[20] ASTM International, D1200-10 Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup, USA: ASTM International, 2018. [Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup \(astm.org\)](https://www.astm.org/standards/D1200)

[21] V. Seitz, K. Arzt, S. Mahnel, C. Rapp, S. Schwaminger, M. Hoffstetter y E. Wintermantel, «Improvement of adhesion strength of self-adhesive silicone rubber on thermoplasticsubstrates - Comparison of an atmospheric pressure plasma jet (APPJ) and a Pyrosil flame,» International Journal of

Adhesion & Adhesives, vol. 66, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.12.009>

[22] A. S. Khanna, «Nanotechnology in High Performance Paint Coatings,» Asian Journal of Experimental Sciences, vol. 21, n° 2, pp. 25-32, 2008. [AS Khanna \(ajesjournal.com\)](http://www.ajesjournal.com)

[23] C.-H. Chen, A. S. T. Chiang, S.-Y. Li, A. T. Wu y Y. S. Sun, «Scratch-resistant zeolote anti-reflective coating on glass for solar applications,» Solar energy materials & solar cells, vol. 95, pp. 1694-1700, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.032>

[24] P.-f. He, H.-d. Wang, S.-y. Chen, G.-z. Ma, M. Liu, Z.-g. Xing, Y.-w. Wang, S.-y. Ding, D.-y. He y X. Chen, «Interface characterization and scratch resistance of plasma sprayed TiO<sub>2</sub>-CNTs nanocomposite coating,» Journal of Alloys and compounds, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153009>

[25] D. Przada, E. Andrzejewska y A. Marcinkowska, «Multimethacryloxy-POSS as a crosslinker for hydrogel materials,» European Polymer Journal, vol. 72, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.09.007>

[26] S. Sepeur, N. Kunze, B. Werner y H. Schmidt, «UV curable hard coatings on plastics,» Thin Solid Films, vol. 351, pp. 216-219, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(99\)00339-9](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(99)00339-9)

[27] C. Gandon, «Sustrato transparente revestido de una capa de polímero.». España Patente ES 2 336 886 T3, 4 Diciembre 2002. [ES2336886T3 - Sustrato transparente revestido de una capa de polímero. - Google Patents](https://patents.google.com/patent/ES2336886T3)

[28] ASTM Intenational, D5264-98R19 Abrasion Resistance of Printed Materials by the Sutherland Rub Tester, Standard Practice F, vol. 15.10, USA: ASTM Intenational, 2019. [Standard](https://www.astm.org/standards/D5264)





[Practice for Abrasion Resistance of Printed Materials by the Sutherland Rub Tester \(astm.org\)](#)

[29] Agr International, Inc., «Tilt Table,» Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.agrintl.com/product/tilt-table/>.

[30] ASTM International, D2578-17 Standard Test Method for Wetting Tension of Polyethylene and Polypropylene Films, vol. 08.02, USA: ASTM International, 2017. [Standard Test Method for Wetting Tension of Polyethylene and Polypropylene Films \(astm.org\)](#)

[31] Plamatreat GmbH, «Tintas de Prueba para determinación de tensión superficial,» [En línea]. Available: [https://www.plamatreat.es/downloads/espanol/01\\_Tintas-de-prueba\\_es\\_low.pdf?m=1481280213](https://www.plamatreat.es/downloads/espanol/01_Tintas-de-prueba_es_low.pdf?m=1481280213). [Último acceso: Julio 2022].

[32] ASTM International, D523-14R18 Standard Test Method for Specular Gloss, vol.

06.01, USA, 2018. [Standard Test Method for Specular Gloss \(astm.org\)](#)

[33] ASTM International, D-3363-20 Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test, vol. 06.01, USA, 2020. [Standard Test Method for Film Hardness by Pencil Test \(astm.org\)](#)

[34] D. H. Lee y R. A. Condrate, «FTIR spectral characterization of thin film coatings of oleic acid on glasses: I. Coatings on glasses from ethyl alcohol,» Journal of Materials Science, vol. 34, n° 0022-2461, pp. 139-146, 1999.. <https://doi.org/10.1023/A:1004494331895>

[35] B. Jiang, X. Shi, T. Zhang y Y. Huang, «Recent advances in UV/thermal curing silicone polymers,» Chemical Engineering Journal, vol. 435, n° 1, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.134843>

Derechos de Autor (c) 2022 Elena Hernández Velázquez, Daniel Gustavo Martínez Toto, María Guadalupe Navarro Rojero



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](#)



# Análisis de correlación del tiempo de vida de taladrina usada en maquina CNC y productividad en industria metalmecánica de Mexicali

## *Correlation analysis of the life time of coolant used in CNC machines and productivity in the metallic industry of Mexicali*

Mildrend Ivett Montoya-Reyes , Juan Ceballos-Corral , Ismael Mendoza-Muñoz , Olivia Yessenia Vargas-Bernal 

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Boulevard Benito Juárez S/N, Parcela, CP 21280, Mexicali, Baja California, México.

**Autor por correspondencia:** Mildrend Ivett Montoya Reyes, <sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Boulevard Benito Juárez S/N, Parcela, CP 21280, Mexicali, Baja California, México, E-mail: mldrend.montoya@uabc.edu.mx, ORCID: 0000-0001-5575-8060.

**Recibido:** 22 de Diciembre del 2021

**Aceptado:** 7 de Noviembre del 2022

**Publicado:** 13 de Noviembre del 2022

**Resumen.** - *El uso de la taladrina en los procesos de maquinado en la industria metálica de Mexicali es de gran relevancia por su funcionalidad de reducir la fricción entre los metales de maquinado (material de maquinado a procesar y herramienta de maquinado). Este proceso de fabricación se genera en un material metálico del que se obtiene un óptimo acabado de una superficie metálica y ayuda en gran medida a alargar la vida útil de las herramientas de la cortadora CNC. En esta investigación se consideraron tres fases en su desarrollo, siendo la primera etapa, una evaluación detallada del uso de la taladrina (diaria, semanal, mensual, estacional y anual), utilizada en un proceso de maquinado de una máquina CNC de un 40% una industria metalmecánica ubicado en la ciudad de Mexicali. En esta fase, se observó un uso considerable de taladrina, de hasta un 40% de mas, ocasionando una gran preocupación del personal gerencial, administrativo y de supervisión por un 25% de gastos extra de gastos económicos; cuyo objetivo de esta investigación, fue la de reducir tanto el uso de taladrina como gastos económicos. La segunda etapa consistió en un análisis de las propiedades fisicoquímicas de la taladrina (viscosidad, y pH), en periodos de cada ocho horas y comparadas con las especificaciones del fabricante para determinar su funcionalidad óptima en el proceso de maquinado. Los análisis fisicoquímicos mostraron que la taladrina con un proceso de recuperación de manera eficiente, podría ser reutilizada, logrando hasta un 80% de recuperación con el proceso propuesto en esta investigación, para su reúso con un funcionamiento óptimo, para lograr un ahorro uso de taladrina y gastos económicos. La tercera etapa fue un análisis de simulación con el software MatLab utilizando el proceso con Simulink y el algoritmo PID (P-Proporcional, I-Integral, D-Derivativo), para determinar las características fisicoquímicas óptimas de la taladrina, evaluando su viscosidad, pH y temperatura en periodos diarios. Esta fase fue relevante para determinar a futuro el uso adecuado de taladrina con el proceso de recuperación y lograr los ahorros propuestos en los objetivos al inicio de este estudio científico. La investigación se desarrolló de 2019 a 2020.*

**Palabras clave:** Industria metalmecánica; Taladrina; Procesos de manufactura; Análisis de simulación

**Abstract.** - *The use of taladrina in cutting processes in the metallic industry of Mexicali is of great relevance due to its functionality of reducing friction between cutting metals (cutting material to be processed and cutting tool). This manufacturing process is generated in a metallic material that an optimal finish of a metallic surface is obtained and helps to a great extent to extend the life of the tools of the CNC cutting machine. In this research, three phases were considered in its development, being the first stage, a detailed evaluation of the use of taladrina (daily, weekly, monthly, seasonally and yearly), utilized in a cutting process of a CNC machine of a metallic industry located in the city of Mexicali. In this phase, a considerable use of coolant was observed, of up to 40% more, causing a great concern of the managerial, administrative and supervisory personnel for a 25% of extra expenses of economic expenses; whose objective of this investigation was to reduce both the use of coolant and economic expenses. The second stage was an analysis of the physicochemical properties of taladrina (viscosity and pH)), in periods of every eight hours and compared with the manufacturer's specifications to determine its optimal functionality in the cutting process. The physicochemical analyzes showed that the coolant with an efficient recovery process could be reused, achieving up to 80% recovery with the process proposed in this research, for its reuse with optimal functioning, to achieve savings in the use of coolant. and economic expenses. The third stage was a simulation analysis with the MatLab software with the use of the Simulink process and the PID algorithm (P-Proportional, I-Integral, D-Derivative), to determine the optimal physicochemical characteristics of taladrina, evaluating its viscosity, pH and temperature in daily periods. This phase was relevant to determine in the future the appropriate use of coolant with the recovery process and achieve the savings proposed in the objectives at the beginning of this scientific study. The investigation was developed from 2019 to 2020.*

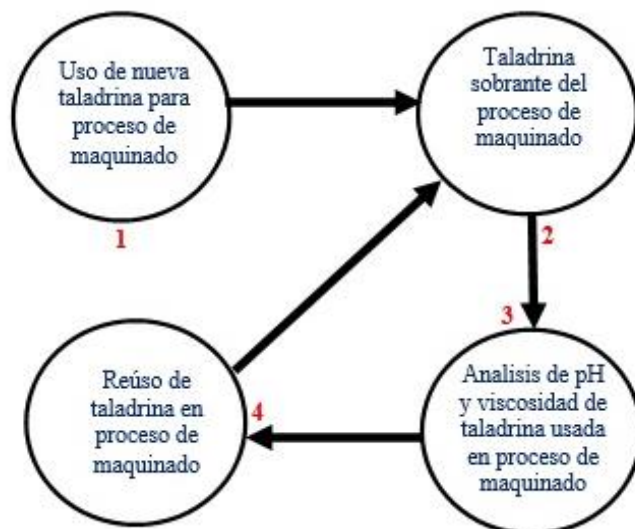
**Keywords:** Metallic industry; Taladrina; Manufacturing processes; Simulation analysis.



## 1. Introducción

El objetivo principal de esta investigación fue el evaluar el rendimiento funcional de la taladrina usada en una maquina CNC de una industria metalmeccánica ubicada en la ciudad de Mexicali. Esto se desarrolló debido a que, en la mayoría de las industrias de este ramo, es lograr un uso óptimo de aceites y lubricantes en este tipo de máquinas industriales. Uno de estos aceites es la taladrina utilizada en operaciones de maquinado en máquinas CNC, que es usada para disminuir la temperatura mientras se elabora el maquinado o pulido de metales [1], [2]. Debido a las estrictas regulaciones ambientales, se han desarrollado estrategias para evaluar el ciclo de vida de la taladrina en base a propiedades fisicoquímicas como pH y viscosidad. Con este estudio científico, se logró determinar en base a sus propiedades fisicoquímicas, la cantidad de veces que se podía reutilizar taladrina en una maquina CNC, donde se elaboró el análisis, para un proceso de maquinado [3]. Esto fue necesario para disminuir gastos económicos y generar un ahorro por compra de material en periodos más largos. El proceso de reuso de taladrina se muestra en la figura 1. La figura 1 muestra la manera en que se utiliza la taladrina en los procesos de maquinado en una maquina CNC en la industria metalmeccánica donde se realizó la investigación. En este tipo de empresa industrial, se fabrican correderas metálicas para muebles de oficina y de casas-habitación, siendo un producto de muy demandado. En dicha figura, se observan cuatro fases, siendo la primera, cuando se coloca en un deposito taladrina nueva que será utilizada en el proceso de maquinado de la maquina CNC [4], [5]. La segunda fase representa la acción de obtener taladrina usada en un primer proceso de maquinado, y pasar a la fase tres que es donde se evalúa la viscosidad con un viscosímetro Mitutoyo y el pH con un pHmetro Metter Toledo [6], [7]. Una vez evaluadas las dos características fisicoquímicas mencionadas en la fase tres, se determina si es posible utilizar la taladrina para un segundo proceso de maquinado y así

sucesivamente se repite el proceso de la fase dos a la cuatro; pudiendo lograr ahorros significativos por no estar comprando constantemente taladrina y con ello disminuir gastos económicos en la industria evaluada. Esto es de acuerdo a los análisis de la fase tres.



**Figura 1.** Etapas de uso de taladrina en maquina CNC para proceso de maquinado. Fuente. Información de la investigación.

### 1.1 Industria metalmeccánica

Este tipo de industria es de gran relevancia en el desarrollo de cualquier region del mundo, generando importante porcentaje del PIB en los países donde se tienen empresas de este sector industrial [8]. La ciudad de Mexicali donde esta localizada la empresa industrial de metalmeccánica donde se realizó la investigación, tiene más de 150 industrias manufacturera, de diferentes sectores como el ramo electrónico, biomédico, metalmeccánico, textil y manufactura de plásticos, esencialmente [9], como se observa en la figura 2, donde la industria metalmeccánica de esta ciudad es de gran importancia en la economía de esta region.



**Figura 2.** Principales industrias establecidas en Mexicali. Fuente. Información de la investigación.

El ramo metalmecánico es muy importante en esta región de la República Mexicana, ubicada en el noroeste del país, y considerada como una zona fronteriza con el estado de California de Estados Unidos, donde se tiene un gran potencial de intercambio comercial, por el nuevo Tratado de Libre Comercio (TLC), entre Estados Unidos, Canadá y México [10]. De las 150 industrias ubicadas en Mexicali, el 35% son del ramo metalmecánico [9], y algunas otras industrias son otro tipo de empresas industriales que tienen al menos una máquina CNC, donde se usa la taladrina. Este tipo de industria utiliza materiales de acero, aluminio, cobre, cromo y níquel; entre los principales, manufacturando desde correderas metálicas para muebles, estructuras para equipos electrónicos, automóviles, aviones, trenes e infraestructura vial, como se ilustran en la figura 3.



**Figura 3.** Materia prima para la fabricación de correderas para muebles en una industria metalmecánica de la ciudad de Mexicali. Fuente. Información de la industria donde se desarrolló la investigación.

La figura 3 ilustra la materia prima utilizada para fabricar las correderas metálicas para muebles en una industria metalmecánica ubicada en Mexicali, siendo muy utilizadas en una gran diversidad de actividades en oficinas, casas-habitación, oficinas e industrias. El material como materia prima es de aluminio. Este tipo de productos es muy requerido en esta zona de la República Mexicana, Esto indica que este tipo de industria es muy importante en el mercado de la región y a nivel global.

### 1.2 Propiedades fisicoquímicas de taladrina

Este tipo de características es de gran importancia en todos los materiales y sustancias utilizadas en cualquier tipo de industria, debido a que, en base a sus especificaciones, se puede determinar el funcionamiento de la taladrina en los equipos y maquinaria industrial del ramo metalmecánico [11]. El uso de taladrina en procesos de maquinado es para actuar como refrigerante y así poder disminuir la temperatura. Además, la taladrina actúa como lubricante para minimizar el rozamiento entre la herramienta de maquinado y la pieza que se está transformando con el proceso de





maquinado para que sea más rápido. También elabora la función de limpieza eliminando virutas generadas en el proceso de maquinado. Existen dos principales tipos de taladrina, donde la primera son emulsiones que usan aceite y agua, y la otra usan aceite, siendo llamadas sintéticas. En esta investigación se utilizó la primera (taladrina), donde se evaluaron dos propiedades fisicoquímicas: pH y viscosidad [12]. Este proceso de análisis fue para determinar si se podía reutilizar este tipo de sustancia líquida conocida como taladrina, y una vez usada en los procesos de maquinado de una CNC, se elaboró un proceso de recuperación para no usar taladrina nueva y así evitar generar nuevos costos. En este estudio científico, se observó que al usar herramientas de la metodología 5S y el mantenimiento preventivo de manera óptima en los periodos requeridos, se pudo mantener a la máquina CNC de análisis, con un rendimiento óptimo. Además, se elaboró un orden adecuado de las herramientas de CNC y en buen estado para su eficiente operación. En base a esto se elaboraron como lo especifica en la fase tres de la figura 1, un análisis de los niveles de pH y viscosidad de taladrina utilizada por primera vez y veces posteriores a esta, indicando en la tabla 1 las especificaciones estándares de pH y viscosidad. La taladrina evaluada fue de color blanca por tener mayor capacidad de disminuir la temperatura en los procesos de maquinado, que los otros tipos de taladrina [13]. El gasto de taladrina usada fue del 60% por lo que el 40% restante, se procedió a reutilizarla con un método especializado, utilizando imanes para retirar virutas o materiales metálicos, que originen alguna situación problemática al momento de reutilizar la taladrina. Los valores de pH y viscosidad fueron representativos de los niveles promedio de cuatro veces al día, en que se suministró taladrina al recipiente instalado en la CNC, para su operación [14], [15]. Con estos dos meses de análisis, se concluyó que el proceso de reciclado es de gran utilidad para reducir costos por uso de taladrina en la industria evaluada. Cabe señalar que una vez que la taladrina no se

puede utilizar se le llama taladrina agotada. Según información técnica de aceites, existen dos tipos de viscosidad, siendo la viscosidad dinámica (también llamada viscosidad absoluta, con una resistencia interna del fluido antes de ser cortado o generar una acción en donde las moléculas se deslicen entre ellas), y la otra es la viscosidad cinemática (la que se relaciona con la densidad de la taladrina) [15]. La densidad de la taladrina blanca 15° C Kg/l es 0.90 kg/m<sup>3</sup> y pH de 9, y conforme se incrementa la temperatura, la densidad disminuye, y si la temperatura disminuye, la densidad aumenta. De acuerdo al estándar ASTM-D-445, la viscosidad estándar a 40 °C es de 16 a 18 cSt (centiStoke, que es la unidad de medición de la viscosidad cinemática). El torno de control numérico (Torno-CNC) donde se realizó el proceso de investigación, contiene un recipiente de 20 litros para la taladrina, que era suficiente para un día de trabajo y utiliza el código G para ser programado y así elaborar sus funciones [16]. En la figura 4 se muestra un torno CNC utilizado en la industria donde se realizó el estudio científico.



**Figura 4.** Torno de control numérico similar usado en proceso industrial de industria metalmeccánica. Fuente: <https://www.mecanizadosgarrigues.es/blog/tornos-cnc/>





La figura 4 muestra un torno de control numérico donde se observa el uso de taladrina color blanca para el enfriamiento de la zona donde se realiza el maquinado. Este torno de control numérico es similar al utilizado en la industria metalmeccánica donde se realizó investigación.

### 1.3 Maquinas CNC

La máquina CNC es también considerada como una maquina automatizada con herramientas de control numérico por computadora [17], [18], que elabora diversas funciones como las que se mencionan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Principales herramientas de máquinas CNC

Operación	Concepto
Amoladora	Es una herramienta eléctrica usada con un motor para cortar, lijar y pulir metales
Cortadora de plasma	Es utilizada para cortar materiales metálicos con un proceso de fundido usando una antorcha de plasma
Fresadora	Desarrolla un proceso de corte generando virutas de manera rotativa
Taladradora	Es una herramienta usada para elaborar orificios en piezas metálicas
Torno	Es un conjunto de herramientas que elaboran diversas operaciones como agujerear, cortar, cilindrar, desbastar, ranurar y roscar en piezas metálicas

En la tabla 3 se muestran los principales tipos de herramientas usadas en máquinas CNC, para los diversos tipos de maquinado, donde se observa que cada herramienta presenta su concepto para ser considerada de acuerdo a los tipos de productos a manufacturar en las industrias metalmeccánica. Los más utilizados en este tipo de industria ubicada en la ciudad de Mexicali, son la fresadora, taladradora y torno.

### 1.4 Procesos de maquinado

Se realizan de acuerdo a las necesidades de los productos a fabricar, donde se representan en la tabla 2, los de mayor utilidad en la industria metalmeccánica [19], [20].

**Tabla 2.** Operaciones con máquinas CNC

Operación	Concepto
Fresado	Fabrica piezas metálicas con diversos tipos de figuras con algunas zonas a profundidad, usando herramienta de punta
Lapeado	Es un proceso que ayuda a mejorar el acabado de una pieza buscando eliminar la rugosidad. Se elabora cuando se frota dos superficies con un abrasivo de grano muy fino
Mandrinado	Se desarrolla para ampliar o mejorar la calidad de un agujero de una pieza fabricada
Rectificado	Se realiza en piezas metálicas que requieren acabados muy especializados para productos específicos
Roscado	Se lleva a cabo en piezas fabricadas donde una parte de estas se elabora el maquinado para generar roscar externas.
Taladrado	Se desarrolla con una herramienta en forma de taladro para fabricar orificios o acabados circulares en piezas
Torneado	Fabrica piezas cilíndricas con una herramienta de corte opera de manera lineal, mientras la pieza gira en su proceso de maquinado
Tronzado	Se realiza cuando una pieza cilíndrica debe ser cortada o separada de una conexión metálica

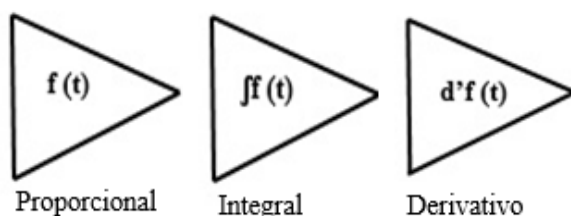
La tabla anterior muestra de manera específica los ocho principales tipos de operación elaboradas por máquinas CNC observándose



cada proceso para cada forma de manufacturar materiales metálicos. Las de mayor aplicación en la industria metalmecánica ubicada en Mexicali, son operación de fresado, rectificado, roscado, taladrado y torneado. Cabe señalar que, en esta ciudad, se tienen grandes empresas industriales que fabrican productos metálicos, así como medianas, pequeñas y microempresas; que tienen algún tipo de operación con CNC.

### 1.5 Análisis de simulación con PID

El desarrollo de simulaciones matemáticas, ha sido de gran relevancia en cualquier tipo de actividad y en especial en procesos industriales de diversos tipos de industrias. En esta investigación se desarrollaron simulaciones matemáticas para estimar el comportamiento de ciertos parámetros involucrados en el procesamiento de materiales metálicos, esencialmente en máquinas CNC. Para la evaluación de este estudio científico, se utilizó el algoritmo PID con el cual se pudo analizar parámetros de temperatura en el proceso de maquinado, además de la dureza del agua, pH y viscosidad que conforman la taladrina usada en máquinas CNC. En la figura 5, se muestran los tres tipos de funciones del algoritmo PID [21].



**Figura 5.** Algoritmo de simulación PID (Proporcional, Integral y Derivativo). Fuente. Información de la investigación

La figura anterior representa los tres de funciones del controlador PID, ilustrando el algoritmo en función proporcional como una función normal  $f(t)$  que no genera ningún cambio en la operación que representa a función. Además, se tiene la función integral  $\int f(t)$  representando un cambio con un decremento en un intervalo de análisis de  $a$  y  $b$  en un gráfico de dos ejes (X, Y). Por último,

se tiene la función derivativa  $f'(t)$ , que representa un cambio con un **incremento** en un intervalo de análisis de  $a$  y  $b$  en un gráfico de dos ejes (X, Y). Estas tres funciones pueden ser utilizadas por separado con una acción de retroalimentación, o pueden ser dos o las tres, dependiendo el tipo de análisis y variables participantes en un estudio científico.

## 2. Metodología

El proceso de la investigación se realizó en tres etapas, como explica enseguida:

*Etapa 1.* Se elaboró una evaluación de la cantidad de uso de taladrina en un torno de control numérico de una industria metalmecánica ubicada en la ciudad de Mexicali, para con ello conocer si se estaba utilizando de manera adecuada la taladrina. Esta evaluación fue en periodos horarios, diarios y semanales durante dos meses, para determinar la cantidad de taladrina usada principalmente de manera diaria. En esta etapa se desarrolló un sistema de recuperación de taladrina.

*Etapa 2.* Se realizaron análisis de dos propiedades fisicoquímicas de la taladrina, siendo el pH y la viscosidad cinemática, para determinar la posibilidad de que se pudiera reciclar el resto de la cantidad de taladrina usada en el proceso de maquinado, siendo el 40%. En esta fase se propuso un sistema con imanes, que está en proceso de desarrollo para una publicación posterior.

*Etapa 3.* Se desarrolló una simulación matemática con el controlador PID, para evaluar las posibles variables que pueden generar el uso óptimo de la taladrina en un torno de control numérico perteneciente a la empresa industrial donde se realizó el estudio científico. El proceso de la metodología se muestra en la figura representado como



diagrama de flujo de la secuencia de etapas elaboradas en esta investigación.

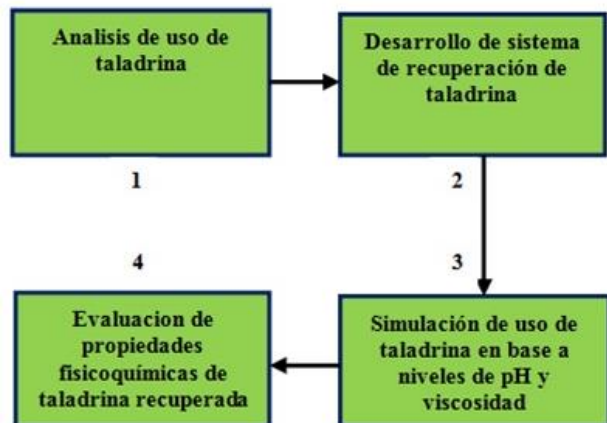


Figura 6. Etapas del proceso de investigación.

La figura 6 muestra las etapas desarrolladas en esta investigación, donde se observa en cada etapa (de la 1 a la 4). Lo novedoso de este estudio científico es determinar en base a el pH y viscosidad, que tanta taladrina se puede recuperar y aplicar el sistema de recuperación en procesos industriales de la industria metalmecánica de la ciudad de Mexicali. Las etapas de la investigación, fueron desarrolladas por separado para obtener la máxima funcionalidad de la taladrina y se explican a detalle en la sección de resultados.

### 2.1 Caso de estudio

Esta investigación se llevó a cabo al detectarse en una empresa del ramo metalmecánico ubicada en la ciudad de Mexicali, de la generación de altos costos por el uso de taladrina, donde se desconocía en ocasiones, si la taladrina tenía funcionalidad para el proceso de maquinado en una máquina CNC con torno. Se tenía un proceso en el cual se realizaba el cambio de taladrina del recipiente de la maquina CNC, sin saber si todavía podía servir como lubricante para el proceso de maquinado. Además, no se verificaban sus propiedades fisicoquímicas como pH y viscosidad, que son relevantes en la funcionalidad de la taladrina. Con esta situación, se procedió a desarrollar el estudio científico en

la empresa ubicada en esta ciudad del noroeste de la República Mexicana.

### 2.2 Herramientas estadísticas

En el proceso de la investigación, se utilizaron las herramientas de Six Sigma y se desarrollaron análisis con herramientas estadísticas como regresión y correlación con una distribución normal; además de análisis de varianza (ANOVA).

### 2.3 Instrumentación utilizada

En estudio científico fue necesario usar un dispositivo medidor de pH (Medidor de pH y temperatura de mesa Laboratorio Milwaukee) y el viscosímetro de Ostwald para medir viscosidad (Viscosímetro Cannon Fenske No. 100 Opaco Sin Calibrar Dc Sci).

### 2.4 Variables del estudio

Se evaluaron las variables de niveles de pH (ácides de 0a 6 o básico de 8 a 14) y viscosidad cinemática, para obtener los valores requeridos para analizar la funcionalidad de la taladrina.

## 3. Resultados

El uso inadecuado de taladrina en torno de control numérico de industria metalmecánica, preocupaba al personal gerencial y de supervisión en la empresa industrial donde se realizó la investigación. En base a eso se realizaron las tres etapas descritas anteriormente.

### 3.1 Analisis del uso de taladrina

Se desarrolló en el periodo inicial de la investigación hasta los dos meses del análisis, para determinar la cantidad de uso de taladrina en un torno control numérico de la empresa evaluada. Esta información se representa en la



tabla 3. El costo de la taladrina de color blanca es de 1000 pesos mexicanos en garrafones de 20 litros, siendo 50 pesos mexicanos por litro. Al principio de la investigación, no se recuperaba nada de taladrina usada y no se generaba ningún ahorro de los costos iniciales de los costos de producción planeados,

**Tabla 3.** Uso de taladrina en torno de control numérico

Taladrina	A	B	C
Semanas			
1	20	0	0
2	14	6	18
3	13	7	22
4	13	7	25
5	12	8	27
6	12	8	30
7	12	8	34
8	12	8	38

A. Cantidad nueva de litros usados en el proceso de maquinado

B. Cantidad de litros recuperados (40% por cada 20 litros)

C. Ahorro porcentual de litros recuperados

La tabla anterior muestra el análisis del uso de taladrina en el proceso de maquinado con el torno de control numérico. Se observa que a medida que la investigación se está desarrollando, se va reutilizando la taladrina y con ello se van recuperando mayor cantidad de litros y generando un ahorro significativo de que disminuía la preocupación gerentes de costos y manufactura y personal de supervisión de procesos industriales. Del 40% que quedaba como resto de taladrina al final del proceso de maquinado por día, se recuperaba un porcentaje por eliminar virutas y otras sustancias derivadas del proceso de maquinado. En esta sección se obtuvo una ecuación matemática en base al análisis de regresión y correlación, mostrándose enseguida:

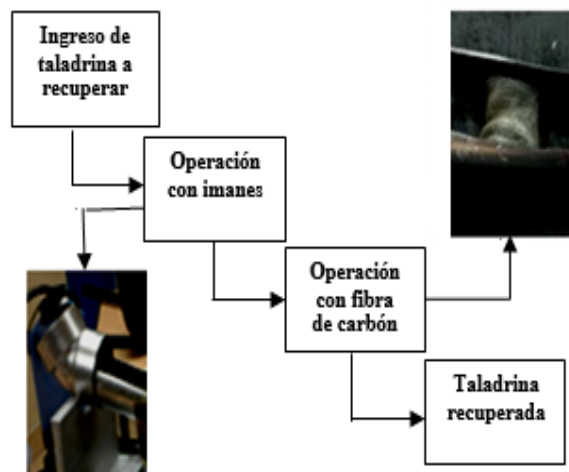
$$F(x) = 2/3 X^3 - 5/9 X^2 + 1/5 X + 5/6$$

Esta ecuación matemática fue obtenida con una serie de datos del uso de taladrina que la empresa tenía desde un periodo de un año antes de iniciar

la investigación, y con esta función matemática, se logró obtener un valor estimado a un futuro de un año del uso de taladrina, que era muy considerable e incrementaría los costos de fabricación. Conforme transcurrió la investigación, se observó que los porcentajes de recuperación y el uso inicial de taladrina el ahorro porcentual mostrados en la tabla 3, indican que este proceso de recuperación de taladrina, es relevante en la maquinaria utilizada en la industria metalmeccánica. Con esto se comprueba de manera cuantitativa, la importancia de este estudio científico que puede ser aplicado no solo en la industria local, sino regional, nacional y mundial.

### 3.2 Desarrollo del sistema de recuperación de taladrina

La segunda etapa consistió del diseño y fabricación del sistema que reciclaba el líquido cortante, para realizar la propuesta a la empresa que permitió realizar el análisis. El diseño se representa en un diagrama de flujo con sus respectivas etapas y fotografías, ilustrando solo lo de mayor importancia en la operación del sistema de reciclaje, mostrado en la figura 7, ilustrándose las cuatro etapas y dos fotografías, siendo la primera foto ubicada en la parte inferior del diagrama, mostrando un sistema de imanes (con un electroimán), que conectado a una fuente de voltaje de 12 voltios, genera un efecto electromagnético y con ello los residuos metálicos del proceso de corte de los metales, y se unen a los extremos de una tubería, iniciando la función de recuperación del agua. La segunda foto ubicada en la parte superior del diagrama, ilustrando una bolsa de carbón activado que elabora el proceso de filtrado de los residuos restantes.



**Figura 7.** Proceso de recuperación de taladrina. Fuente. Información de la investigación

### 3.3 Evaluación de propiedades fisicoquímicas

El análisis realizado de propiedades fisicoquímicas (pH y viscosidad) fue en el mismo periodo del uso de taladrina blanca con las ocho semanas para determinar si la taladrina era óptima para ser usada de nuevo en el proceso de maquinado. Además, se examinó a simple vista, si los productos fabricados presentaban manchas de algún color después de elaborar el proceso de maquinado en una CNC, con taladrina reutilizada. La información obtenida de los análisis de pH y viscosidad, se muestran en las tablas 4 y 5.

**Tabla 4.** Relación de pH y temperatura de taladrina (2019)

Día	A		B	
	T, °C	pH	T, °C	pH
1	40	8	42	6
2	41	8	41	6
3	40	8	41	7
4	42	8	43	7
5	40	9	44	7
6	40	9	41	7
7	41	9	40	7
8	40	9	42	8

A. No Generó Manchas en Superficie Metálica de Productos Fabricados

B. Genero Manchas en Superficies Metálicas de Productos Fabricados

La tabla 4 representa los niveles de pH a una temperatura estuvo oscilando entre los 40 °C a 42 °C en las ocho semanas evaluadas, cuando no se presentaron manchas en los productos metálicos fabricados. En cambio, cuando la temperatura osciló entre los 41 °C y 44 °C, los productos metálicos manufacturados presentaron manchas como principios de presencia de fenómeno de corrosión. La información numérica obtenida indicó que, al inicio de la investigación, el pH fue de 8 en las primeras cuatro semanas y en las siguientes cuatro semanas fue de 9. En esta fase de este análisis con el pH descrito no se generaron manchas en los productos manufacturados. Para la siguiente fase de este análisis, el pH presentado fue 6 en las primeras dos semanas, de 7 en las siguientes cinco semanas y de 8 en la última semana, generando manchas en los productos fabricados, debido al pH con tendencia a nivel ácido. Posteriormente se realizó la evaluación de la viscosidad cinemática, expresando la información en la tabla 5.

**Tabla 5.** Relación de viscosidad y temperatura de taladrina (2019)

Día	A		B	
	T, °C	Viscosidad, cSt	T, °C	Viscosidad, cSt
1	40	15	42	17
2	41	15	41	17
3	40	16	41	18
4	42	16	43	19
5	40	17	44	19
6	40	17	41	20
7	41	18	40	20
8	40	18	42	20

A. No Generó Manchas en Superficie Metálica de Productos Fabricados

B. Genero Manchas en Superficies Metálicas de Productos Fabricados

La tabla 5 representa los niveles de viscosidad cinemática, ilustrando a diversos índices de temperatura, presentándose acciones similares al análisis del pH, con respecto a la presencia



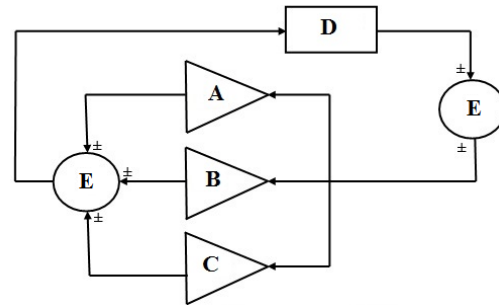


sin manchas en los productos metálicos fabricados, con temperaturas de oscilando desde los 40 °C a los 42 °C; y con manchas con temperaturas y entre los 41 °C y 44 °C. Los valores de viscosidad cinemática del análisis sin la generación de manchas fueron de 15 a 18, en el rango normal, exceptuando el primer valor de 15. En el análisis donde se generaron manchas, los valores fueron de 17 a 20, estando los valores 17 y 18 en el rango y fuera del rango Esto fue de acuerdo a como estuvo oscilando la temperatura. Respecto a los niveles de viscosidad cinemática, se observó que, si la temperatura se incrementa, la viscosidad cinemática disminuye y con ello la taladrina blanca recuperada fluye con mayor rapidez, solo que no actuó al 100% como refrigerante al momento de elaborar el proceso de maquinado. Es por esto que se incrementaba la temperatura. Aun con los niveles variantes de pH y viscosidad cinemática, el porcentaje de productos con manchas era bajo, por lo que este tipo de análisis muestra que la recuperación de taladrina puede ser una opción para el ahorro de costos por la compra de este material usado en tornos de control numérico con sus procesos de maquinado.

### 3.4 Simulación matemática de recuperación de taladrina

Esta evaluación se realizó con el controlador PID en el software MatLab con la aplicación de Simulink. El análisis niveles de correlación de las variables involucradas en la simulación matemáticas, siendo la temperatura dentro del torno con control numérico en el proceso de maquinado, como variable de entrada y el pH y la viscosidad cinemática como variables de salida, representados por la figura 8 como el proceso de simulación. El porcentaje de error fue medido un índice de comparación de niveles de pH y viscosidad con cantidad de piezas fabricadas, para determinar los periodos de tiempo en los cuales la taladrina era funcional para los procesos de maquinado en la maquina CNC. Los datos para los análisis estadísticos fueron obtenidos con los

dispositivos medidores de pH y viscosidad, así como de la cantidad de piezas con contadores electrónicos.



**Figura 8.** Representación de la simulación matemática del proceso de maquinado. Fuente. Información de la investigación

A-  $f(t)$ , B- $ff(t)$ , C- $f^2(t)$ , D-Industrial process, E-Error

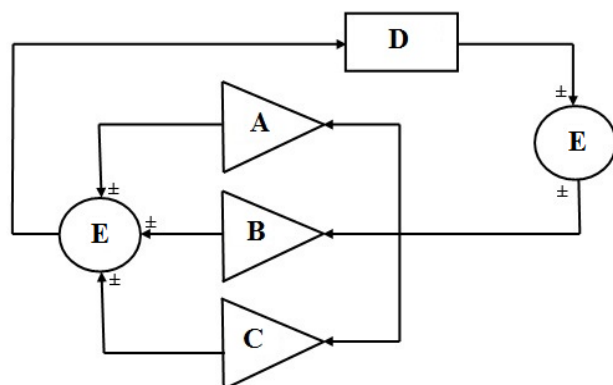
La figura 8 muestra la manera de cómo se utilizó el PID en el proceso de maquinado con las variables mencionadas y descritas en la tabla 6, como lo indica su análisis. Las funciones del PID, fueron explicadas anteriores, ilustrando el cuadro con el proceso industrial y el proceso de retroalimentación con los márgenes de error en cada evaluación de correlación. Se elaboró una simulación con los periodos similares a los análisis del inicio de la investigación de ocho semanas, para determinar en periodos cortos la posibilidad de tener un proceso de recuperación de taladrina lo más óptimo posible y de ahorro de costos, que fue la meta principal de la industria donde se realizó el estudio científico.

**Tabla 6.** Analisis de correlación con la simulación matemática

Factores Semanas	Temperatura,	pH	Viscosidad cinemática,
1	0.86	0.89	0.87
2	0.83	0.86	0.84
3	0.80	0.84	0.81
4	0.79	0.81	0.78
5	0.76	0.78	0.75
6	0.74	0.74	0.72
7	0.73	0.73	0.71
8	0.72	0.70	0.70



La tabla anterior ilustra los niveles de correlación de las tres variables principales involucradas en el proceso industrial de maquinado, indicando que, a mayor índice de correlación, se relacionan las variables evaluadas. El tener valores iniciales cercanos a 0.9 en las tres variables, representa que la temperatura tiene un efecto considerable y la taladrina funcionaba correctamente como refrigerante. Conforme transcurrió el periodo de análisis, el índice de correlación, fue disminuyendo hasta el nivel de 0.7 o cercano a este, indicando que la taladrina funcionaba como refrigerante, pero con un efecto menor, por lo que debía de cambiarse por taladrina nueva. Esto fue, para que no se dañaran los productos fabricados, ni se generaran manchas en estos, así como proteger la herramienta del taladro de control numérico. Para estimar a futuro de corto plazo por periodos de cada dos meses, se elaboró una simulación matemática con el controlador PID, obteniendo las funciones matemáticas óptimas para cada algoritmo en la figura 9, representando una estimación con un nivel de error del 0.05%.



**Figura 9.** Simulación matemática del proceso de maquinado. Fuente. Información de la investigación.

A-  $f(t) = 4s / (9s + 4)$

B-  $f(t) = (3s^2 + 5s - 7) / (2s - 8)$

C-  $f(t) = (4s + 6) / (6s^2 - 3s - 9)$

D-Industrial process

E-Margen de Error en Retroalimentación

Como se observa en la figura anterior, con las funciones óptimas obtenidas, se determinaron los periodos adecuados de uso de taladrina reusada y la nueva.

Con estas funciones matemáticas se obtuvo una estimación de la relación de valores de pH y viscosidad a futuro para determinar los periodos de cambio de la taladrina y de mantenimiento preventivo de la maquina CNC evaluada.

#### 4. Conclusiones

La investigación mostró la posibilidad de reutilizar taladrina de un torno de control numérico de una industria metalmecánica ubicada en la ciudad de Mexicali. Este tipo de industria en esta ciudad es de gran importancia en el desarrollo económico de la region, por lo que existe una gran cantidad de estas empresas industriales desde grandes industrias hasta microempresas con diversos tipos de maquinado. Los índices de correlación confirmaron la posibilidad del reúso de la taladrina, para generar ahorro en costos, en base al sistema de recuperación con imanes y la fibra de carbono. Este es un prototipo de análisis para con el proceso de mejora continua, disminuir los costos y con ello generar máximas ganancias económicas. Las evaluaciones en cada etapa fueron relevantes para obtener la máxima eficiencia del uso de taladrina en el torno de control numérico analizado. Esta investigación fue para determinar en una maquina CNC en especial de torno del uso óptimo de taladrina, y con este mismo proceso pueden ser evaluados otros tipos de sistemas mencionados en la tabla 2, que pueden operar en conjunto con la maquina CNC. Este estudio científico será relevante para obtener un óptimo ahorro del uso de taladrina, y con ello reducir los costos de manufactura de la industria metalmecánica local, regional, nacional e internacional.

#### 5.- Reconocimiento de autoría

*Mildrend Ivett Montoya Reyes:*  
 Conceptualización; Recursos; Ideas;  
 Metodología; Análisis formal; Investigación;



Recursos; Análisis de datos; *Juan Ceballos Corral: Ideas*; Investigación; Análisis de datos; Escritura. *Ismael Mendoza Muñoz: Conceptualización; Metodología; Análisis formal; Investigación; Análisis de datos; Revisión y edición; Administración de proyecto.* *Olivia Yessenia Vargas Bernal: Metodología; Análisis formal; Investigación; Recursos; Análisis de datos.*

## Referencias

[1] Albertí M, Ciurana J, Rodríguez C, Özel, T "Design of a decision support system for machine tool selection based on machine characteristics and performance tests", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Springer Ed., Volume 22, Número 1, pp 263-277, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10845-009-0286-6>.

[2] Kurt A. "Modeling of the cutting tool stresses in machining of Inconel 718 using artificial neural networks", *Expert Systems with Applications Journal*, Elsevier Ed., Volume 36, Numero 6, pp 9645-9657, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.12.054>.

[3] Montero G. Laura (2010) "Estudio del mecanizado de materiales compuestos", Proyecto de Fin de Carrera, Departamento de Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, pp 114, 2010, [Estudio del mecanizado de materiales compuestos \(uc3m.es\)](http://www.uc3m.es).

[4] González F, Rosado P "Control Numérico. Marco y Fundamentos", Segunda Edición, Editorial Universitat Politècnica de Valencia, pp 150, 2015, [CONTROL NUMÉRICO. MARCO Y FUNDAMENTOS. 2ª EDICIÓN \(upv.es\)](http://www.upv.es).

[5] Cruz F "Control Numérico y Programación II: Curso Practico", Editorial S. A. Marcombo, pp 426, 2010, [CONTROL NUMERICO Y PROGRAMACION II: CURSO PRACTICO \(2ª ED.\) | FRANCISCO CRUZ TERUEL | Casa del Libro México](http://www.casa-del-libro.com).

[6] Travieso A "Ingeniería de los Procesos de Fabricación Mediante el Arranque de Virutas", Editorial Delta Publicaciones, pp 201, 2014, [INGENIERIA DE LOS PROCESOS DE FABRICACION MEDIANTE EL ARRANQUE DE VIRUTAS. TRAVIESO RODRIGUEZ ANTONIO J.. Libro en papel. 9788492954032 Librería El Sótano \(elsotano.com\)](http://www.deltapublicaciones.com).

[FABRICACION MEDIANTE EL ARRANQUE DE VIRUTAS. TRAVIESO RODRIGUEZ ANTONIO J.. Libro en papel. 9788492954032 Librería El Sótano \(elsotano.com\)](http://www.deltapublicaciones.com).

[7] Jiménez A "Diseño, programación, simulación y fabricación en CNC con programas de CAD/CAM", Tesis de Maestría, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, pp 225, 2018, [Repositorio Institucional de la UNAM](http://repositorio.institucional.unam.mx).

[8] López G, Sánchez C, Paz J, Ling J "Análisis de corrosión en aceros con recubrimientos impacta en la competitividad en la industria metalmeccánica de Mexicali", *Revista Investigación y Ciencia*, Volume 24, Numero 69, pp 39-46, 2016. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2016691868>.

[9] INDEX, "Reporte de la Industria Maquiladora-Mexicali", pp 25, 2020, <http://www.itmexicali.edu.mx>

[10] Chelminsky A "La implementación del T-MEC: una prueba para América del Norte", Centro de Estudios Internacionales Gilberto Bosques, pp 269, 2021, [La implementación del TMEC, una prueba para América del Norte | T-MEC | Gobierno | gob.mx \(www.gob.mx\)](http://www.gob.mx).

[11] Samatham M, Shravan A, Vidyanand Sai P, Reddy S "A Critical review on Minimum Quantity Lubrication (MQL) Coolant, Hyderabad, T.S., India", *International Journal of Current Advanced Research*, Vol 6, Numero 5, pp 1745-1751, 2016, [PDF\) A Critical review on Minimum Quantity Lubrication \(MQL\) Coolant System for Machining Operations \(researchgate.net\)](https://www.researchgate.net).

[12] Sharma V, Singh G, Sorby K "A Review on Minimum Quantity Lubrication for Machining Processes", *Materials and Manufacturing Processes Journal*, Volume 30, Número 8, pp 935-953, 2015. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.994759>.

[13] Dureja J, Singh R, Singh T, Singh P, Dogra M Bhatti M (2015) "Performance Evaluation of Coated Carbide Tool in Machining of Stainless Steel (AISI 202) under Minimum Quantity Lubrication (MQL)", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green*



Technology, Editorial Kispé and Springer, Volume. 2, Numero. 2, pp. 123-129. <https://doi.org/10.1007/s40684-015-0016-9>.

[14] Gaurav G, Atish G, Atulya S, Rohit P, Shubham K (2018) "Influence of Coolant in CNC machining", International Journal of Advance Engineering and Research Development Volume 5, Issue 03, March 2018, pp 604-607, [Influence of Coolant in CNC machining | International Journal of Advance Engineering and Research Development \(IJAERD\)](#).

[15] Gaurav G, Atulya S, Rohit P, Kunal I, Himanshu K (2018) "Study of Parameters Affecting Tool Life", International Journal of Advance Engineering and Research Development Volume 5, Issue 03, March 2018, pp 252-256, [Study of Parameters Affecting Tool Life | International Journal of Advance Engineering and Research Development \(IJAERD\)](#).

[16] Thakur, D, Ramamoorthy B, Vijayaraghavan, L "Investigation and Optimization of Lubrication Parameters in High-Speed Turning of Superalloy Inconel 718", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 50, Numero 5-8, pp. 471- 478, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2538-1>.

[17] Wang, C, Chen M, An Q, Wang M, Zhu Y, "Tool Wear Performance in Face Milling Inconel 182 using Minimum Quantity Lubrication with Different Nozzle Positions," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Volumen 15,

Numero 3, Issue 1, pp 557-565, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12541-014-0371-4>.

[18] Prashant W, Nitin A, Satish Ch, (2016) "A Review on Tool Wear Monitoring System", Journal of Mechanical Engineering and Automation, Volume 6, Issue 5A, pp 49- 53, [A Review on Tool Wear Monitoring System \(sapub.org\)](#).

[19] Chandrashekar B, Ashwin G, Udaykumar A, (2014) "Study on Cutting Tool Life", Conference: NATIONAL Conference on Recent Trends in Mechanical Engineering August 13th 2014, pp 79-88, [\(PDF\) Study on Cutting Tool Life \(researchgate.net\)](#).

[20] Turgay K, Gurcan S, Adem C (2012) "Taguchi Method Based Optimization of Drilling Parameters in Drilling of AISI 316 Steel with PVD Monolayer and Multilayer Coated HSS Drills", Measurement Journal, Volume 45, Issue 1, pp 547-557. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.02.022>.

[21] Sulaymon E "Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional", Editorial APRESS, pp 100, 2019, [Beginning MATLAB and Simulink: From Novice to Professional - Sulaymon Eshkabilov - Google Libros](#).

Derechos de Autor (c) 2022 Elena Hernández Velázquez



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](#)





# Energy consumption of an internet of things development board

## *Consumo de energía de una placa de desarrollo de internet de las cosas*

Gabriel Lee Álvarez-Rosado <sup>1</sup>, Kevin Adrián Martínez-Hernández <sup>1</sup>, Mario Alberto Camarillo-Ramos <sup>1</sup>, Verónica Quintero-Rosas <sup>1</sup>, Arnoldo Díaz-Ramírez <sup>1</sup>, Roberto López-Avitia <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Mexicali, Department of Computer Systems. Av., Tecnológico S/N CP 21376 colonia Elías Calles, Mexicali, Baja California, México.

<sup>2</sup>Department of Bioengineering, Universidad Autónoma de Baja California, Boulevard Benito Juárez S/N, Parcela 44, CP 21280, Mexicali, Baja California, México.

**Corresponding author:** Mario Alberto Camarillo Ramos, TECNM/ Instituto Tecnológico de Mexicali, Avenida Álvaro Obregón S/N, CP 21100 Colonia Nueva, Mexicali Baja, California, México. E-mail: [mario.camarillo@itmexicali.edu.mx](mailto:mario.camarillo@itmexicali.edu.mx). ORCID: 0000-0003-0700-1885.

Recibido: 30 de Agosto del 2022

Aceptado: 14 de Noviembre del 2022

Publicado: 23 de Noviembre del 2022

**Abstract.** - *Internet of Things is a highly applicable technology due to its versatility in areas such as agronomy, health applications, and industry. Besides, portability makes these devices affordable. IoT development boards communicate through Wi-Fi transmitted messages via the Internet, depending on the inner workings of the IoT development board, energy consumption can vary in such transmission. Furthermore, this consumption could change if the board is powered by different power supplies and the quantity of Wi-Fi transmitted messages. This paper provides a methodology to acquire an energy profile when sending data (byte) using Message Queue Telemetry Transport (MQTT) protocol on DEVKIT V1 NodeMCU-32 (ESP32) development board. Three different power supplies were used for the board, a 3.7 LiPo Battery, 5v usb Power bank and 9V NiMh rechargeable battery. The higher current consumption obtained was using a 3.7 battery, followed by 5v and the lowest current consumption was when using 9v. However, results demonstrate that when using the 9v power supply the energy consumption is two times higher than using 3.7v. Therefore, the best voltage source for transmission and energy consumption using a NodeMCU-32 development board will be 3.7 volts.*

**Keywords:** IoT; Energy consumption; ESP32; Microcontroller.

**Resumen.** - *El Internet de las Cosas es una tecnología de gran aplicación por su versatilidad en áreas como la agronomía, las aplicaciones sanitarias y la industria. Además, la portabilidad hace que estos dispositivos sean asequibles. Las placas de desarrollo de IoT se comunican a través de mensajes transmitidos por Wi-Fi a través de Internet, según el funcionamiento interno de la placa de desarrollo de IoT, el consumo de energía puede variar en dicha transmisión. Además, este consumo podría cambiar si la placa se alimenta con diferentes fuentes de alimentación y la cantidad de mensajes transmitidos por Wi-Fi. Este documento proporciona una metodología para adquirir un perfil de energía al enviar datos (byte) mediante el protocolo de transporte de telemetría de cola de mensajes (MQTT) en la placa de desarrollo DEVKIT V1 NodeMCU-32 (ESP32). Se utilizaron tres fuentes de alimentación diferentes para la placa, una batería LiPo 3.7, un banco de energía USB de 5v y una batería recargable NiMh de 9V. El mayor consumo de corriente obtenido fue al utilizar una batería de 3.7, seguido de 5v y el menor consumo de corriente fue al utilizar 9v. Sin embargo, los resultados demuestran que cuando se usa la fuente de alimentación de 9v, el consumo de energía es dos veces mayor que cuando se usa la fuente de alimentación de 3,7v. Por lo tanto, la mejor fuente de voltaje para transmisión y consumo de energía utilizando una placa de desarrollo NodeMCU-32 será de 3,7 voltios.*

**Palabras clave:** IoT; Consumo de energía; ESP32; Microcontrolador.





## 1. Introduction

Internet of things (IOT) is an emerging technology in which data transmission and information access among any objects or devices becomes easier, thus making life easier in many aspects [1]. This technology has grown exponentially. According to a report by Cisco, the number of internet-connected devices will be more than triple that of the global population. [2] Such rise in IoT devices will lend itself to a diversity of applications such as smart energy, smart building and health monitoring equipment. IoT is nothing but communication between devices all over the globe. This essentially upsurges inter-connectivity and sharing of data between devices and people. This leads to various issues which makes the IoT framework vulnerable in terms of scalability, security, privacy, energy efficiency, etc. [3]. Although IoT technologies are in the forefront of research and development [1], battery technologies are not evolving as fast to keep up with these emerging technologies. In addition, security requirements of IoT devices strains energy consumption, making optimization a necessity. Unfortunately, most programmers and developers lack the knowledge regarding software/energy dependence, failing on energy-friendly algorithm development. Researchers are continuously looking for ways to improve the energy efficiency of software running on embedded systems. Energy efficiency has a great impact on choosing the right MCU for a particular application [4]. Power management is a topic for static and mobile systems. In static systems, a well power management will reduce generated heat and electricity bills, and for mobile systems provide longer battery life. Power consumption of an MCU depends on operating voltage and current [5]. Different techniques can be implemented to reduce the power consumption, particularly in microcontrollers [6][7] [8].

IoT devices have offered improvement for development in multiple areas, but these benefits

might be limited by hardware and electronic design. There is a small list of advantages and disadvantages:

- **Advantages:**
  - High portability.
  - Low Cost.
- **Disadvantages:**
  - Limited memory
  - Limited processing
  - Limited energy

Most IoT devices are battery powered, hence these are battery restricted. Furthermore, these devices become useless or inoperable until a battery replacement is performed, which can represent a high operating cost for the IoT device. To reduce cost, it is necessary to maximize the use of energy and reduce battery replacement as much as possible.

Considering that IoT devices are wireless, there exists various ways to communicate with another device (M2M), thus sharing data becomes crucial and significant about energy consumption for IoT applications [9][10], since it is necessary a certain procedure to send data, which will take resources from the board, a wireless technology such as Bluetooth, WIFI, Zigbee, Lora, among others, must be necessary. However, when using WIFI, it is possible to standardize the process in how information is sent using the following protocols:

1. The MQTT (MQ Telemetry Transport) is a simple Internet of things communication protocol. It is based on passing messages between clients through the central server. The client can be of the publisher type, sending their messages to defined topics (address, topic). The publisher can be represented by a sensor or meter [11].
  - a) CoAP (Constrained Application Protocol) is a specialized web transfer protocol for use with



constrained nodes and constrained networks in the internet of things. It is generally used for machine-to-machine communication (M2M) [12].

- b) In addition, HTTP (Hypertext Transfer Protocol) is an application protocol for distributed, collaborative, hypermedia information systems that allows users to communicate data on the World Wide Web [13].

These communication protocols are some of those used for the development of IoT applications, also called application layers. A study by Eclipse in 2021 [14] states that the top three communication protocols used by developers are MQTT with 44%, HTTP with 26% and REST with 23%.

When using IoT devices, it is beneficial to know how much energy is consumed when transmitting data using a protocol. Then, we will be able to optimize the number of messages that are necessary to transmit a byte, increasing the amount of running battery time that application requires.

## 2.- Related work

People have been concerned with analyzing energy consumption in IoT devices, implementing a similar approach to the one shown in this work.

In [9], an analysis of the current used in a development IoT device is done, making emphasis on the analysis of current consumption, using the ESP8266 development board for its cost, this article analyzes, Device on and off power task (Wake up, sleep mode), DHT22 sensor data acquisition, as well as the energy required to establish connection to the internet and a MQTT server.

They compare MQTT and aMQTT, a small variant of the protocol, yielding a very similar current consumption in both variations. Furthermore, the execution time is less when using aMQTT variant, thus representing a lower energy consumption.

In [15], a comparison of the different quality levels of the MQTT protocol (light QoS) is done with the ESP32 device, using a multimeter. This performs an analysis of battery voltage drop with respect to time. They state that the quality level QoS1 has a lower consumption compared to other levels.

In [16] a comparison of quality levels (QoS levels) has been done with the ESP8266 microcontroller, where a digital multimeter is used to monitor energy consumption. Results show that energy consumption with a higher quality level generates a very high energy consumption compared to the lowest level.

An ESP8266 development board is used in [17], which performs the task of using two different sensors, DHT22 and TSL2561, they observe battery life with the number of messages per MQTT sent in a time of one second and a half second. They conclude that when sending a message every second, you get approximately twice the battery life that when sending messages every 0.5 seconds.

In [18], several protocols used for the IoT industry are compared. They perform a simulation between them using the software WANem [19], based on simulations they obtain the energy consumption calculated by the number of packages. They conclude that the MQTT protocol consumes more energy than the COaP protocol.

A comparison of different communication protocols evaluated on the same development board, COaP, MQTT, HTTP is done in [20] they performed 25 read cycles for each protocol with



a shunt resistance of 5.5 Ohm using 7.5 volts as their power supply. An average of the energy consumption is acquired and comparison is made, thus the protocols MQTT and COaP, are the most suitable for IoT devices.

## 2.- How MQTT works

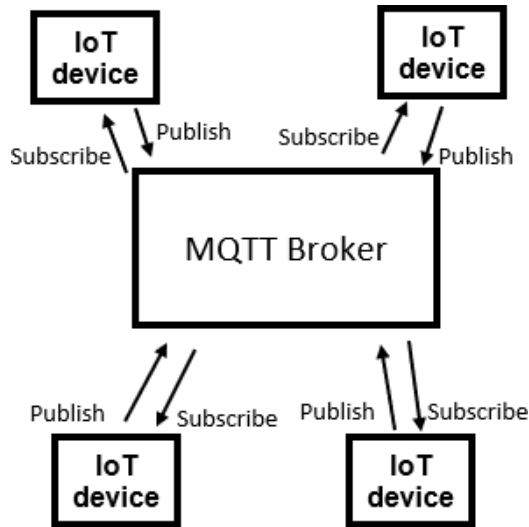


Figure 1.- MQTT Pub/Sub Architecture

MQTT is a lightweight, fast communication protocol designed for IoT. This allows communication between different devices using a Publish/Subscribe model [21][22]. To do this you need to use a broker which works as a server. The IoT device can request data and send it directly to the broker. Publications are made by topic, and to read this information you need to subscribe to the correct topic. Figure 1 shows an example of how IoT communication and brokering works.

MQTT has three levels of quality (QoS):

QoS0 (At most once):

- Message not confirmed by receiver if received

QoS1 (At least once):

- The transmitted message may arrive one or more times until the recipient returns a confirmation response.

QoS2 (Exactly once):

- Each message transmitted is received only once and is confirmed by the receiver.

The broker can be created locally, or remotely, you can observe a few brokers that can be implemented locally:

- Mosquitto [23]:
  - MQTT version 3.11 y 5.0.
  - QoS levels, QoS0, QoS1, QoS2.
- Mosca MQTT [24]:
  - MQTT version 3.1 and 3.11.
  - QoS levels, QoS0 and QoS1.
- ACTIVEMQ [25]:
  - MQTT version 3.1.
  - QoS levels, QoS0, QoS1, QoS2.

## 3.- Materials and methods

MQTT is analyzed as it is of the most used protocols by developers, using a broker mosquitto implemented in windows with the quality level QoS0.

Many companies produce devices for the development of applications with IoT. One such device is the arduino Yun [26], which offers wifi and ethernet connectivity for IoT applications. Microchip has several devices [27][28]. These include wifi connectivity for IoT application development.

ESPRESSIF, also develops the ESP32 [29] and ESP8266[30] boards, which are ready for IoT applications.



**Table 1.** Recommended IoT devices.

Devices	Connectivity	Cost
ESP32	wifi & bluetooth	18 dlls
ESP8266	wifi	16 dlls
PIC IoT	wifi	95 dlls
Arduino yun	wifi & ethernet	95 dlls
Raspberry pizero	wifi	68 dlls

This article uses a DEVKIT V1 NodeMCU-32 (ESP32) development board. This is a 32-bit MCU with Wi-Fi and Bluetooth dual mode, which makes it suitable for Internet of Things applications.

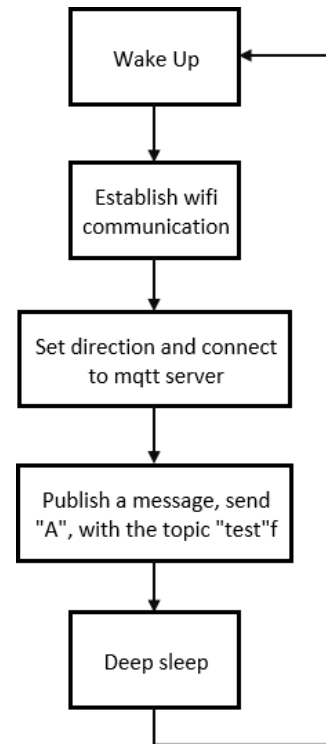
The development board is used with three power supplies at different voltages. Table 2 provides the voltages as well as the type of power supply.

**Table 2.** Three different power supplies used for NodeMCU-32.

Voltage	Type
9 v	NiMH rechargeable battery 450 mAh
5 v	USB Power Bank 5000 mAh
3.7 v	Li-Po Battery 500mAh

The code used to evaluate the energy consumption when sending data using the Wi-Fi module is the one provided by the manufacturer. First, basic configuration of the Wi-Fi module is set to establish network Wi-Fi communication. Afterwards, the ip address and port are defined. Then a publication is performed, therefore the ascii character "A" with the topic "test" is sent, this for MQTT (QoS0) message requirements. After sending the information, the algorithm goes into deep sleep via the WDT (WatchDog Timer)

set to 1 millisecond; After the WDT finishes, it wakes up the NodeMCU-32 and the process restarts. The same algorithm is used to evaluate the energy consumption with every voltage source. Figure 2 describes the implemented Algorithm.



**Figure 2.-** Proposed algorithm to measure power consumption on MQTT

Current consumption of the Algorithm is measured using an USB Oscilloscope (Analog Discovery 2 [31]) and a Current Ranger [32].

The latter allows us to take precise current measurements, and also avoids the problem of burden voltage present in most Digital Multimeters (DMMs), whilst the former is used to measure the voltage provided by the current meter.

Figure 3 illustrates the measurement setup used for the oscilloscope. Time division is set until two periods are shown on screen (50 ms/div), resulting in a sample frequency of 5.1613KHz for Channel 1, taking 8192 samples. The voltage



range was set to 100mV/div, offset set to 0 V and the sample mode as Average. It's important to note that oscilloscope input channels are equipped with Differential inputs. The current ranger has a hardware 7kHz RC Low Pass Filter at the output and will produce a clean smooth trace on the oscilloscope, very effective for current MCU measurements.

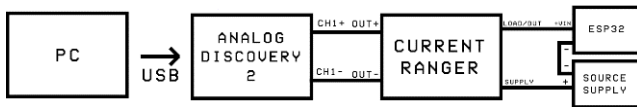


Figure 3. Measurement setup.

DIAdem [33] (National Instruments) is used to analyze the acquired signal. A waveform's period is integrated to obtain energy (Joules), and also multiplied by its respective voltage source to obtain the period's electric charge (Coulomb). A close view of the waveform signal in deep sleep mode just before restarting is shown on Figure 4, the red signal corresponds to a voltage of 3.7volts, the blue signal is when using 5 volts, and the green signal is at 9 volts.

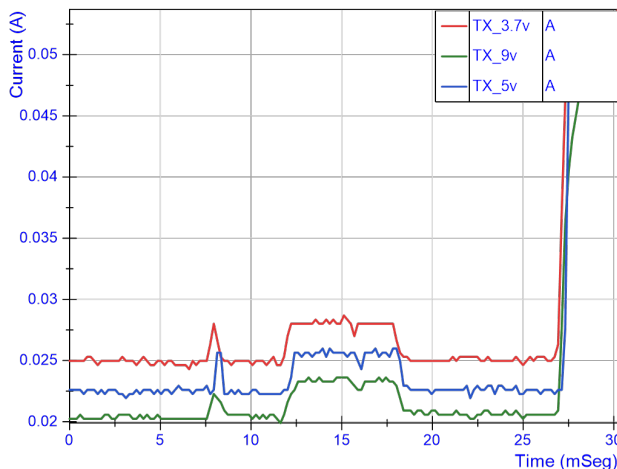


Figure 4.- Current waveforms at different supply voltages in Deep Sleep Mode.

Figure 5, shows one period of the waveform. The NodeMCU-32 runs the algorithm and starts on sleep mode, notice that before going to sleep a higher energy spike can be observed. The signal has an approximate duration of 300 milliseconds.

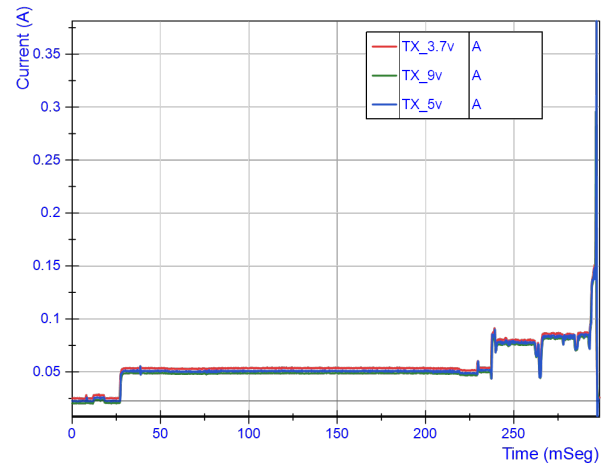


Figure 5. Period of data transmission

### 3. Results and discussions

Tables 3 through 5 show the mean current (in mA), mean energy (in mJ) and mean charge (in mC) obtained for every power source applied. The mean current consumption applying 5v is 4.35% less than using a 3.7v supply, something similar happened when comparing 3.7v and 9v sources, the current consumption is 7.86% less than 3.7v. This current variation may be caused by the voltage regulator. But evaluating energy (Joules), when using a 5v source yields 27.98% more energy than 3.7 battery source. Using a 9v source, the energy consumption is 119.7% higher than 3.7v. Furthermore, analysis of electric charge (Coulombs), shows that electric charge when using a 9v source will be 9.8% less than 3.7v, and 5v will be 5.8% less than 3.7v.

Table 3 shows the real current consumption, electric charge consumption and energy consumption for sending data through the internet of the NodeMCU-32 with every power supply. It is important to note that the internal linear regulator is operating when using 5v and 9v power sources. For 3.7v the regulator is not active.





**Table 3.** Current consumption of the NodeMCU-32

Voltage	Current		
	Mean	Min	Max
3.7v	57.03 mA	24.28 mA	254.4 mA
5v	54.55 mA	8.4 mA	381.2 mA
9v	52.55 mA	19.89 mA	295.6 mA

**Table 4.** Coulombs consumption of the NodeMCU-32

Voltage	Electric charge (Coulomb)		
	Mean	Min	Max
3.7v	7.41 mC	0 mC	17.03 mC
5v	6.99 mC	0 mC	16.20 mC
9v	6.69 mC	0 mC	15.66 mC

**Table 5.** Joule’s consumption of the NodeMCU-32 using the algorithm.

Voltage	Energy (Joules)		
	Mean	Min	Max
3.7v	27.43 mJ	0 mJ	27.43 mJ
5v	34.98 mJ	0 mJ	81.31 mJ
9v	60.28 mJ	0 mJ	140.99 mJ

By finding the electrical constants, we can estimate the duration of the device in operation, we can use the following equation:

$$t = \text{battery(mAh)} / \text{load (mA)} \quad (1)$$

**Equation 1.** Estimated time of work

We perform the analysis for each voltage source, using the same capacity of 500 mAh, we can observe in table 6 the estimated time in which the algorithm could be running.

**Table 6.** Estimated time of execution

Voltage	mAh	Duration
3.7v	500 mAh	8.76 hrs
5v	500 mAh	9.16 hrs
9v	500 mAh	9.51 hrs

Using the electric charge, we can give an estimate of how many messages are possible to transmit through MQTT, where we first need to find the charge in the batteries we are using, as shown in table 7. We perform the analysis assuming all power sources with a capacity of 500 mAh.

**Table 7.** Conversion from mAh to Coulomb

Battery	mAh	Coulomb	Messages
3.7v	500 mAh	1800 c	242.91k
5v	500 mAh	1800 c	257.51k
9v	500 mAh	1800 c	269.05k

Looking at table 7, we can determine that it is possible to send approximately 242.91k data in messages with a battery of 3.7v and 500mAh, this may or may not be enough depending on the application. Using the other power sources, it's possible to send 257.5k data messages using a battery of 5v and 500 mAh, and 269k data messages using a battery of 9v and 500mAh.

The Developer/Designer has to contemplate the amount of data to send. This information could help estimate the time of duration of the developed application.



### 3. Future work

For further research, we plan to analyze the NodeMCU-32 when it Wakes Up. During tests, we notice that some peripherals (input/output) have been initialized into a logical high state, which represents an energy consumption issue. If there is an alternative to optimize energy consumption without modifying the initial algorithm, it will be the first step for a proper energy efficiency analysis. Furthermore, we also plan to apply the methodology of this paper to analyze different IoT MCU Boards, to see if there is a significant difference in energy consumption.

### 4. Conclusion

The microcontroller NodeMCU-32 suitable for IoT applications has been tested sending data through the internet using three different commercial power supplies, 3.7v, 5v and 9v. The higher current consumption was using 3.7 battery, followed by the 5v and the lowest current consumption was when using 9v. More voltage yields less current consumption; however, this does not mean less energy consumption, results demonstrate that when using 9v the energy consumption is two times higher than using 3.7v. The best option for energy optimization without modifying the algorithm for NodeMCU-32 when sending data will be using a 3.7v Li-po Battery.

### 5.- Authorship acknowledgements

*Gabriel Lee Álvarez Rosado:* Analysis of experiments, algorithm design. *Kevin Adrián Martínez Hernández:* Documentation and database. *Mario Alberto Camarillo Ramos:* Project Management, Instrumentation. *Verónica Quintero Rosas:* Project Management, Instrumentation. *Arnoldo Díaz Ramírez:* Analysis of results, Documentation. *Roberto López Avitia:* Documentation, data analysis.

### References

- [1] S. Wasoontarajaroen, K. Pawasan, and V. Chamnanphrai, "Development of an IoT device for monitoring electrical energy consumption," in 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2017, pp. 1-4: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICITEED.2017.8250475>
- [2] D. Evans, "The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything," 2011.
- [3] M. Bansal and B. Gandhi, "IoT Based Development Boards for Smart Healthcare Applications," in 2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA), 2018, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/CCAA.2018.8777572>
- [4] M. M. Al-Kofahi, M. Y. Al-Shorman, O. M. J. C. Al-Kofahi, and E. Engineering, "Toward energy-efficient microcontrollers and Internet-of-Thing's systems," vol. 79, p. 106457, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.106457>
- [5] Tsekoura, Rebel, Glösekötter and Berekovic, "An evaluation of energy efficient microcontrollers," Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), pp. 1-5, 2014. <https://doi.org/10.1109/ReCoSoC.2014.6861368>.
- [6] Holberg, Arne. "Innovative Techniques for Extremely Low Power Consumption



- with 8-bit Microcontrollers", Atmel, 2006.  
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc7903.pd>.
- [7] Brant, Ivey. "Low-Power Design Guide" Microchip, 2015.  
<https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an1416>.
- [8] Richey, Rodget. "Low-Power Design Using PICmicro Microcontrollers", Microchip, 2015.  
<https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an606>
- [9] W. Thongdy keophilavong, Muhammad Nur Rizal "Data Transmission in Machine-to-Machine Communication Protocols for Internet of Things Application: A Review," International Conference on Information and Communications Technology 2019.  
<https://doi.org/10.1109/ICOIACT46704.2019.8938420>
- [10] O. Akintade, T. Yesufu, and L. J. I. J. I. T. Kehinde, "Development of an MQTT-based IoT Architecture for Energy-Efficient and Low-Cost Applications," vol. 2019, pp. 27-35, 2019.
- [11] MQTT.org. Mq telemetry transport. 2013 Available: <https://mqtt.org>.
- [12] C. Bormann. RFC 7252 Constrains Application protocol. 2016. Available: <https://coap.technology>
- [13] R. F. T. Berners-Lee, H. Frystyk., Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.0. 1996. <https://doi.org/10.17487/rfc1945>.
- [14] E. fundation, "IoT & Edge developer survey report December 2021," Eclipse fundation2021
- [15] E. Baranauskas, J. Toldinas, and B. Lozinskis, "Evaluation of the impact on energy consumption of MQTT protocol over TLS," 05/15 2019.
- [16] J. Toldinas, B. Lozinskis, E. Baranauskas and A. Dobrovolskis, "MQTT Quality of Service versus Energy Consumption," 2019 23rd International Conference Electronics, 2019, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/ELECTRONICS.2019.8765692>.
- [17] V. Kanakarlis, G. Papakostas, and D. V. Bandekas, "Power consumption analysis on an IoT network based on wemos: a case study," TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), vol. 17, p. 2505, 10/01 2018. Bandyopadhyay and A. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v17i5.11317>.
- [18] Bhattacharyya, "Lightweight Internet protocols for web enablement of sensors using constrained gateway devices," 2013 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 2013, pp. 334-340.  
<https://doi.org/10.1109/ICCNC.2013.6504105>.
- [19] H. K. K. Manoj Nambiar, Debadatta Mishra, Shirish Rane, Pravin Pardeshi. (2007). WANem. Available: <https://wanem.sourceforge.net>.
- [20] M. Pavelic, V. Bajt, and M. Kusek, "Energy efficiency of machine-to-machine protocols," in 2018 41st International Convention on Information and Communication Technology,



- Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2018, pp. 0361-0366: IEEE. <https://doi.org/10.23919/MIPRO.2018.8400069>.
- [21] S. Kraijak and P. Tuwanut, "A survey on IoT architectures, protocols, applications, security, privacy, real-world implementation and future trends," 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2015), 2015, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1049/cp.2015.0714>.
- [22] MQTT Version 5.0. Edited by Andrew Banks, Ed Briggs, Ken Borgendale, and Rahul Gupta. 07 March 2019. OASIS Standard. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html>. Latest version: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>.
- [23] R. A. Light, "Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol," The Journal of Open-Source Software, vol. 2, no. 13, May 2017, <https://doi.org/10.21105/joss.00265>.
- [24] M. Collina. (2013). Mosca. Available: <https://github.com/moscajs/mosca>.
- [25] APACHE. ACTIVEMQ. Available: <https://activemq.apache.org>.
- [26] ARDUINO. (2022). Arduino YUN. Available: <https://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-yun>.
- [uino-yun](https://www.arduino.cc/retired/boards/arduino-yun).
- [27] MICROCHIP. PIC-IOT WG DEVELOPMENT BOARD. Available: <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/AC164164>.
- [28] MICROCHIP. AVR-IOT WG DEVELOPMENT BOARD. Available: <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/AC164160>.
- [29] ESPRESSIF. ESP32. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- [30] ESPRESSIF. ESP8266. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>.
- [31] DIGILENT. Analog Discovery 2: 100MS/s USB Oscilloscope, Logic Analyzer, and Variable Power Supply. Available: <https://digilent.com/shop/analog-discovery-2-100ms-s-usb-oscilloscope-logic-analyzer-and-variable-power-supply/>.
- [32] LowPowerlab. (2018). CurrentRanger. Available: <https://lowpowerlab.com/guide/currentranger/>.
- [33] N. Instruments. (2022). What is DIAdemsoftware?. Available: <https://www.ni.com/en-us/shop/dataacquisition-andcontrol/application-software-for-data-acquisition-and-control-category/what-is-diadem.html>.



Derechos de Autor (c) 2022 Gabriel Lee Álvarez Rosado, Kevin Adrián Martínez Hernández, Mario Alberto Camarillo Ramos, Verónica Quintero Rosas, Arnoldo Díaz Ramírez, Roberto López Avitia



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](#)





# Habitabilidad de la vivienda social. Caso: Fraccionamiento Urbi Villa del Cedro, Culiacán, Sinaloa

## *Habitability of low-cost housing. Case: Urbi Villa del Cedro, Culiacán, Sinaloa*

Carolina Barraza-Bracamontes<sup>1</sup>, Yazmin Paola Íñiguez-Ayón <sup>1</sup>, César Domingo Íñiguez-Sepúlveda <sup>1</sup>,  
Gonzalo Bojórquez -Morales <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. de las Américas S/N y Priv. Universitarios, Cd. Universitaria, 80013, Culiacán Rosales, Sinaloa, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Baja California, Bulevar Benito Juárez S/N, Unidad Universitaria, 21280 Mexicali, Baja California, México.

**Corresponding author:** Dra. Yazmín Paola Íñiguez Ayón, Planeación y Desarrollo Sustentable, Universidad Autónoma de Sinaloa, Blvd. de las Américas S/N y Priv. Universitarios, Cd. Universitaria, 80013, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. E-mail: [paola.iniguez@uas.edu.mx](mailto:paola.iniguez@uas.edu.mx). ORCID 0000-0002-7503-7815.

Recibido: 11 de Octubre del 2021

Aceptado: 23 de Noviembre del 2022

Publicado: 28 de Noviembre del 2022

**Resumen.** - *El concepto de la habitabilidad tiene que ser tomado en cuenta e implementado en las políticas de vivienda sobre todo en el siglo XXI, debido a que es importante buscar las condiciones óptimas de confort, y generar una satisfacción por el espacio que se habita. El objetivo de este trabajo fue describir la habitabilidad de la vivienda social en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, desde dos enfoques, uno psicosocial y el otro físico-espacial para determinar la habitabilidad de los espacios arquitectónicos de la vivienda social. El tipo de investigación fue descriptivo-explicativo y se desarrolló en dos vertientes, la primera fue psicosocial, y la segunda físico-espacial. La primera se realizó a través del estudio de las relaciones del individuo con su vivienda midiendo la habitabilidad psicosocial mediante la aplicación de un cuestionario y, en la segunda se midió la habitabilidad térmica, acústica y lumínica utilizando diferentes instrumentos de medición mecánicos según el tipo de habitabilidad. Los resultados obtenidos se compararon con la normatividad internacional y nacional; aunque un primordial descubrimiento fue la inexistencia de un marco normativo propio para establecer criterios específicos para evaluar la confortabilidad en la vivienda social. Con los resultados obtenidos en esta investigación se observó que los encuestados sienten satisfacción y orgullo por su vivienda, por considerarla un patrimonio familiar. Sin embargo, la percepción de los espacios se encontró una tendencia a calificarlos negativamente, debido a que los espacios fueron diseñados con los metros cuadrados mínimos. En las cuestiones técnicas como térmica, acústica y lumínica se observó que la mayoría de las viviendas no alcanzaron los estándares para tener viviendas confortables. A partir de este tipo de estudios se puede observar, describir y medir las problemáticas físicas y espaciales derivadas de no tomar en cuenta los preceptos de la habitabilidad y diseñar los espacios arquitectónicos de las viviendas sociales con los elementos mínimos.*

**Palabras clave:** Habitabilidad; Vivienda social; Habitabilidad psicosocial; Confort térmico; Confort lumínico.

**Abstract.** - *The concept of habitability has to be considered and implemented in housing policies, especially in the 21st century, because it is vital to seek optimal comfort conditions and generate satisfaction with the inhabited space. This work aimed to describe the habitability of social housing in the city of Culiacán, Sinaloa, from two approaches, one psychosocial and the other physical-spatial, to determine the habitability of the architectural spaces of social housing. The type of research was descriptive-explanatory and was developed in two aspects, the first was psychosocial, and the second was physical-spatial. The first was carried out by studying the individual's relationship with his home and measuring psychosocial habitability through a questionnaire. In the second, thermal, acoustic, and light habitability was measured using different mechanical measuring instruments according to the type of habitability. The results obtained were compared with international and national regulations. However, a significant discovery was the inexistence of its normative framework to establish specific criteria for evaluating comfort in social housing. The results obtained in this investigation showed that the respondents feel satisfaction and pride in their home, considering it a family heritage. However, the perception of the spaces tended to rate them negatively because they were designed with minimum square meters. In technical issues such as thermal, acoustic, and lighting, it was observed that most houses did not reach the standards to have comfortable houses. From this study, it is possible to observe, describe and measure the physical and spatial problems derived from not taking into account the precepts of habitability and designing the architectural spaces of social housing with the minimum elements.*

**Keywords:** Habitability; Low-cost housing; Psychosocial habitability; Thermal comfort; Lighting comfort.



## 1. Introducción

La habitabilidad es el atributo de los espacios construidos para satisfacer las necesidades objetivas (dimensión físico-espacial) y subjetivas (dimensión psicosocial) de los individuos y grupos que los habitan [1]. Sin embargo, la habitabilidad también debe enfocarse a satisfacer las necesidades básicas a partir del uso eficiente de los recursos disponibles, y con ello justificar su fin social y ambiental de su existencia [2].

Por otra parte, a partir del primer decenio del siglo veintiuno, la política de desarrollo de vivienda social en México promovió la construcción masiva de nuevos conjuntos habitacionales en las periferias urbanas con ello se favoreció una baja mezcla de uso de suelo, ocasionado con ello problemas ambientales, urbanos, sociales y económicos [3]. Lo que ha generado una crisis urbana que afecta el desarrollo social y económico de las personas impactando en la calidad de vida, los espacios públicos y la vivienda.

Asimismo, en México en el 2010 había 4,997,806 viviendas deshabitadas y para el 2020 este número se incrementó a 6,155,682 [4],[5]. Ante ello existe un 14 % de viviendas deshabitadas algunas de las causas son la migración, el desempleo, la violencia y espacios públicos inadecuados [3]. Además, según datos del Banco Interamericano de Desarrollo, la calidad y materiales de los inmuebles son deficientes en 35 de cada 100 viviendas [6].

Lo antes mencionado, denota que la producción de vivienda social se ha centrado en atender la demanda habitacional en términos físicos, pero no ofrece una vivienda que cumpla los requerimientos como morada de familias e individuos, ni que resuelva las necesidades de las personas como seres sociales, ofreciendo un ambiente confortable y digno [7]. Esto ha provocado que los habitantes terminen por abandonar su vivienda [8].

Hablar de la vivienda social en México significa establecer deficiencias en muchos aspectos y dimensiones de la habitabilidad, un indicador de ello son las viviendas deshabitadas o abandonadas, y su baja cualificación como hábitat, lo cual influye en la calidad de vida de la población en general [7]. También, la vivienda sobre todo la social, ha sufrido modificaciones a lo largo del tiempo, a partir de 1980 disminuyeron las dimensiones de los espacios básicos notablemente [9]. Aspectos que afectan los principios de la habitabilidad.

Aunque existen estudios sobre la vivienda social, estos tienen enfoques diferentes, la vivienda social en México [3], la factibilidad de la vivienda social [10], condiciones socio-habitacionales de la vivienda de interés social [11], experiencias y significado de la vivienda social [12], confort térmico [13], [14], [15], [16] factores físicos y psicológicos relacionados con la habitabilidad [17], [18], [19]. Sin embargo, en la literatura se ha tocado muy poco el tema de la habitabilidad desde los enfoques físico-espacial y psicosocial.

El fenómeno de habitabilidad debe ser una prioridad para los espacios privados de los individuos, en este sentido la vivienda es el lugar más íntimo de una persona y es en este recinto donde la habitabilidad se evidencia cien por ciento, pero no es exclusivo de este espacio [20]. Indudablemente existe una producción masiva de vivienda, sin embargo, es pertinente medir los estándares mínimos de habitabilidad. Existe una falta de información sobre la percepción, el comportamiento, y satisfacción alcanzados por los usuarios que habitan una vivienda [17], así como una evaluación desde el aspecto físico, espacial, arquitectónico y técnico de los distintos espacios de los cuales está conformada la vivienda. A partir de estos aspectos evaluar las condiciones reales de habitabilidad.



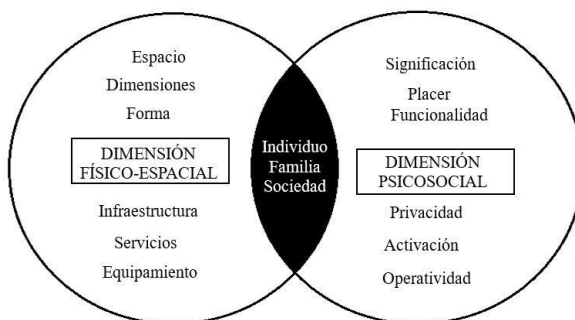
Por lo antes expuesto, existe una necesidad de investigar sobre la vivienda desde el punto de vista de la habitabilidad, a partir de un análisis objetivo y subjetivo de los prototipos de vivienda social y la relación con los usuarios. En este sentido, el objetivo de esta investigación es describir la habitabilidad de la vivienda social en la ciudad de Culiacán, Sinaloa, desde dos enfoques, el objetivo (físico-espacial) y subjetivo (psicosocial), para determinar la situación en la que se encuentran los espacios arquitectónicos a partir de los indicadores de la habitabilidad.

### 1.1 La Habitabilidad en la Vivienda

El hábitat como concepto proviene del latín *habitare* que significa vivir. Su principal desarrollo proviene de la ecología, para la que el hábitat es el ambiente o lugar que ocupa una población biológica y al cual se encuentra adaptada. Habitar es un rasgo fundamental del hombre, es la raíz de todas sus construcciones, desde las pequeñas casas en cuevas hasta los grandes edificios que fueron hechos para habitar [18].

Por otra parte, el estudio de la habitabilidad surgió del interés por mejorar la vivienda, ya que, al aumentar la población, se generó la exigencia de la construcción masiva, orientándose especialmente a la de interés social. En este sentido, el hombre está en constante aprendizaje, por ello el concepto de habitabilidad cambia según la época y con ella deben cambiar los estándares de calidad de este, es por lo que la construcción principalmente de vivienda debe buscar incorporar al objeto habitable elementos y valores que enriquezcan el espacio, de manera que este satisfaga a sus moradores. La habitabilidad se trata de la unión de ciertas condiciones que permiten a un ser vivo habitar o morar un lugar [21].

La habitabilidad tiende a satisfacer necesidades objetivas y subjetivas a partir de los espacios construidos y estas necesidades están dadas por los individuos y grupos que los habitan [18]. Esta satisfacción de las necesidades objetivas está relacionada con la dimensión físico-espacial, y la parte subjetiva con la psicosocial, cada una de estas dimensiones están inmersas en diferentes factores como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Modelo conceptual de la dimensión físico-espacial y psicosocial Fuente: Elaboración propia, basado en [17].

Los factores objetivos se componen por todos los indicadores medibles o cuantificables que tienen relación directa con la percepción que posee el individuo de su hábitat, compuesto por la vivienda, el vecindario y la ciudad. Los factores subjetivos son las transacciones psicológicas que se presentan entre las relaciones existentes entre el individuo y su vivienda con el vecindario y la

ciudad; dependen directamente de la interpretación particular de cada sujeto [17].

Por otra parte, la vivienda social estaba destinada a satisfacer las condiciones básicas de habitabilidad de las clases sociales con menos recursos. Sin embargo, a finales del siglo XX y primeras décadas del siglo XXI, el pensamiento



funcionalista y global llegó a reducir el concepto de vivienda social a vivienda mínima, que en ciertas ocasiones es más económica, lo cual implicó una reducción de la calidad del espacio y los materiales, bajando la calidad de las condiciones de habitabilidad y olvidando por completo el ámbito bioclimático y confort del usuario [9].

La habitabilidad en la vivienda se puede definir también como el ámbito de ciertos factores y variables espaciales y psicosociales de comportamiento observables, que aluden a la relación entre el individuo y el objeto arquitectónico [22]. En consecuencia, dichos factores y variables tienen una expresión de valor diversa en cada uno de los conjuntos observados, en donde la lectura transversal de los mismos permite definir categorías de niveles de habitabilidad deseados en la vivienda.

Por lo tanto, la habitabilidad en la vivienda, para esta investigación, se abordará al nivel del espacio habitable dentro de la vivienda, desde el enfoque objetivo en donde se analizará y medirá todo lo relacionado con los factores de la habitabilidad en particular con temperatura, sonido y luminancia, y el otro subjetivo, en el cual se analizarán las perspectivas, expectativas, necesidades y experiencias del usuario. A su vez, el estudio de la habitabilidad dentro de la vivienda se encuadra en diferentes tipos de habitabilidad con sus respectivos factores, se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Tipos y factores de habitabilidad en la vivienda.

Tipo de habitabilidad	Factores
Habitabilidad psicosocial	Percepción, seguridad, felicidad, confort
Habitabilidad físico-espacial	Espacio arquitectónico
Habitabilidad térmica	Temperatura del ambiente
Habitabilidad acústica	Nivel de ruido
Habitabilidad lumínica	Luminancia

Fuente: Elaboración propia, basado en [17]

## 2. Metodología

Este estudio se realizó a partir de dos enfoques: el físico-espacial y el psicosocial. En el primero se midió la habitabilidad térmica, acústica y lumínica utilizando instrumentos de medición como un monitor de estrés térmico, un luxómetro y un sonómetro. Los resultados obtenidos se compararon con la normatividad internacional como la ISO 7243:2017 [23], BOE-A-2007-18397 [24], Norma Nacional de Emisión de Ruido y Ruido Ambiental [25] y EN 12464-1 [26]; y nacional como la NOM-015-STPS-2001 [27], NOM-011-STPS-2001 [28], NOM-025-STPS-2008 [29], NOM-081-SEMARNAT-1994 [30] y a partir de ello se establecieron las comparaciones de las mediciones *in situ* y las determinadas por las normas establecidas. El segundo se hizo a través del análisis de las relaciones del individuo con su vivienda midiendo la habitabilidad psicosocial a partir de la percepción de este con respecto a: la seguridad, la satisfacción por la vivienda, el confort (acústico, térmico y lumínico) y el espacio arquitectónico.

### 2.1 Caso de estudio

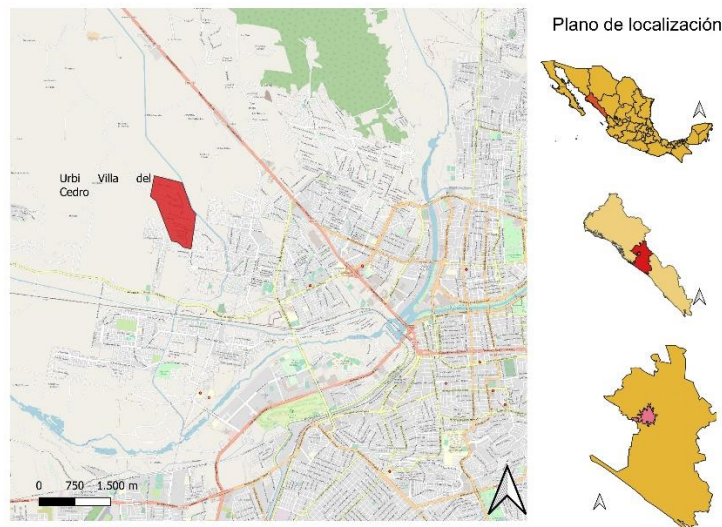
Para delimitar el caso de estudio de esta investigación se emplearon diversos criterios:

- a. Fecha de construcción de las viviendas: se seleccionó un fraccionamiento con una consolidación máxima de 10 años, esto con el objetivo de seleccionar en la muestra el mayor número de viviendas sin modificaciones arquitectónicas.
- b. Fraccionamiento compuesto por viviendas de interés social: se busca conocer la percepción de las personas que habitan una vivienda social.
- c. Fraccionamiento con condiciones adversas al diseño: como antecedentes de siniestro para conocer si la vivienda realmente cumplió con su deber de proteger a los usuarios cuando más se necesitó.



Con base en los elementos anteriormente mencionados, se seleccionó el fraccionamiento Urbi Villa del Cedro, el cual cumple con todos los criterios. Este fraccionamiento se encuentra

ubicado en la zona noroeste de la ciudad de Culiacán (ver figura 2).



**Figura 2.** Plano de localización Fuente: Elaboración propia.

De la misma manera, para la elección del tipo de vivienda del fraccionamiento (ver figura 3) se consideraron los siguientes criterios [3], [31]:

- a. Vivienda social unifamiliar.
- b. Viviendas con el lote de construcción no menor a los 96 m<sup>2</sup> ni mayor a los 120 m<sup>2</sup>, pues estas son las medidas que indica la ley de vivienda.
- c. Viviendas con zonas habitables básicas: estancia, sala, comedor, cocina, dos recamaras, un baño completo y un patio de servicio. Cabe destacar que estos espacios deberán
- d. contar con las medidas mínimas enlistadas en el capítulo institucional.
- e. Sin modificaciones arquitectónicas del diseño original.
- f. El precio de la vivienda no debe ser mayor a los 118 y menor a 350 veces el salario mínimo mensual del Distrito Federal (VSM MDF).
- g. Sistema constructivo similar.
- h. Cualquier tipo de orientación de fachada.
- i. Que el habitante de la vivienda tenga como mínimo un año viviendo en ella.





**Figura 3.** Viviendas fraccionamiento Urbi Villa del Cedro. Fuente: Elaboración propia.

La zona seleccionada del fraccionamiento se compone de 837 lotes con las siguientes características (tabla 2).

**Tabla 2.** Viviendas en fraccionamiento Urbi Villa del Cedro.

Características	Número de viviendas
Diseño original	256
Con modificaciones	439
Abandonadas	142
<b>Total</b>	<b>837</b>

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estas características el universo a estudiar se conformó por 256 viviendas, las cuales están ubicadas en los cuatro puntos cardinales y cada una está conformada por los espacios básicos:

- a. Sala – comedor
- b. Cocina
- c. Dos recamaras
- d. Un baño completo
- e. Pasillo
- f. Patio de servicio.

Las especificaciones de construcción de la vivienda son:

1. Cimentación: losa de cimentación de concreto con acero reforzado.

2. Estructura: muros de block con castillos y cadenas de cerramiento, losa de concreto armado.
3. Piso: vitropiso sencillo blanco.
4. Puertas: de mdf.
5. Ventanas: perfiles de aluminio con cristal natural.
6. Instalación hidráulica: tubería de cobre tipo M.
7. Instalación sanitaria: tubería de PVC.

## 2.2 Determinación de la muestra

Se utilizó un muestreo probabilístico [32]. Para ello primero se procedió a seleccionar el número de viviendas a analizar, para su elección se consideraron los criterios para la elección del tipo de vivienda del fraccionamiento anteriormente expuestos.

La cantidad de viviendas se determinó a partir de la siguiente ecuación [33]:

$$n = \frac{NZ^2pq}{d^2(N-1)+Z^2pq} \quad (1)$$

Dónde:

n = tamaño de la muestra

N = Tamaño del universo (256)

p= probabilidad a favor (50 %)

q = probabilidad en contra (50 %)

d = nivel de precisión absoluta (10 %)

Z= constante determinada a partir del nivel de confianza requerido (90 %, 1.65)



El resultado al sustituir los valores en la ecuación fue un total de 52 viviendas a caracterizar.

Para seleccionar dentro del fraccionamiento las viviendas específicas a analizar se utilizó el método de selección determinístico, el cual consiste en realizar una encuesta en la primera vivienda que cumpla con las características señaladas y que el habitante recomiende una siguiente vivienda para encuestar, así hasta conseguir el total calculado. Al final se pudo caracterizar a 54 viviendas.

### 2.3 Diseño de cuestionario

Para diseñar el cuestionario que se aplicó en esta investigación, primero se hizo un análisis de tres cuestionarios [34], [35] y [36] los cuales contaron con rubricas de univocidad, esta consiste en que un grupo de expertos determine si los reactivos son entendibles para el encuestado y si las respuestas de estos ayudarían a cumplir con el propósito de la investigación.

El cuestionario diseñado para esta investigación se integró por 47 reactivos, de los cuales 30 se preguntaron directamente a la persona para conocer su percepción y 17 el encuestador capturó con los datos arrojados por los instrumentos de medición (monitor de estrés térmico, luxómetro y sonómetro) colocadas *in situ*, las mediciones fueron tomadas en un solo momento, el día que se aplicó el cuestionario y mientras duraba su aplicación. Además, se dividió por tipos de habitabilidad, en cada división se realizó una o máximo dos preguntas por factor, al final de cada división se colocó un apartado donde se capturaron los datos arrojados por cada aparato de medición. La encuesta se aplicó del 9 al 17 de mayo del 2018.

### 2.4 Medición de temperatura

La medición de la temperatura se llevó a cabo con el monitor de estrés térmico el cual detecta la temperatura y la clasifica con base en la humedad. La denominación estándar mundial para ello es la WBGT (Wet Bulb Globe

Temperature Index), este índice está compuesto por tres parámetros: temperatura de evaporación (tnw), temperatura global (tg) y temperatura del aire (ta), al momento de medir, este instrumento proporciona la temperatura actual del espacio y los niveles de estrés térmico que se generan en el mismo.

Una vez obtenidos los datos, se calculó el índice WBGT [36] ISO 7243 [22], a partir de la combinación de dos parámetros ambientales, la temperatura de globo T y la temperatura de humedad natural THN. Para espacios interiores, sin radiación solar se calcula con la siguiente ecuación:

$$WBGT = 0.7 THN + 0.2 TG + 0.1 TA \quad (2)$$

El THN, es la Temperatura Húmeda Natural, es el valor indicado por un sensor de temperatura recubierto de un tejido humedecido que es ventilado de forma natural; TG es la temperatura de globo, esta es la temperatura indicada por un sensor colocado en el centro de una esfera de 150 mm de diámetro, con un coeficiente de emisión medio de 90 (negro y mate) y tan delgado como sea posible; por último, la TA, es la Temperatura del Aire.

### 2.5 Medición de sonidos

Para la medición de sonidos se utilizó un sonómetro el cual es un instrumento que permite medir niveles de presión sonora, este mide el nivel de ruido que existe en el lugar donde se instale y en el momento dado, este trabaja con unidades de decibeles. Lo que el sonómetro mide se le conoce como contaminación acústica.

La metodología que se utilizó para medir este parámetro fue la determinada por la norma NOM-011-STPS-2001 [30], la cual indica que, para evaluar el ruido, el punto de medición debe ubicarse en el lugar donde la persona habitualmente ocupe más tiempo de actividad o lo más cercano posible, la altura del sonómetro,



cuando las actividades se realicen de pie, debe ser de 1.45 m, cuando se realicen sentados, el micrófono debe colocarse a la altura de la cabeza del individuo. Fue de esta manera como se colocaba el instrumento a la hora de tomar la medición.

## 2.6 Medición de Luminancia

Esta medición se hizo por medio de un luxómetro el cual es un instrumento diseñado y utilizado para medir niveles de iluminación o iluminancia en luxes. El nivel de iluminación es la cantidad de flujo luminoso por unidad de área medido en un espacio donde se desarrollan actividades [23]. Este contiene una célula fotoeléctrica que capta la luz y la convierte en impulsos eléctricos, los cuales se interpretan en escala de luxes. Además, para que el luxómetro este dentro de norma, debe contar con: detector para medir la iluminación, corrección conoidal, corrección de color y exactitud de  $\pm 5\%$  (considerando la incertidumbre pre la calibración).

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana de las condiciones de iluminación en los centros de trabajo NOM-025-STPS-2008 [24], la metodología para tomar las mediciones se divide en dos partes, la primera es cuando en el espacio se utiliza iluminación artificial y la segunda cuando solo se requiere iluminación natural, para el caso de esta investigación se retomó la metodología para iluminación natural.

Los puntos de medición fueron seleccionados en función de las necesidades y características de cada espacio, de tal manera que describían el entorno ambiental de la iluminación confiablemente. Por lo tanto, en el caso de la vivienda, se seleccionaron tres puntos de medición diferentes dentro del espacio:

- Espacio más cercano a la fuente de luz natural
- Espacio con mediana cercanía a la fuente de luz natural

- Espacio más alejado de la fuente de luz natural

Como paso final, el cálculo del nivel promedio de iluminación se realizó con la siguiente ecuación:

$$E_p = \frac{1}{N} (\sum E_i) \quad (3)$$

Donde:

$E_p$  = nivel promedio en lux

$E_i$  = nivel de iluminación medido en lux en cada punto

$N$  = Numero de mediciones realizadas

## 3. Resultados y discusión

De la muestra de 54 viviendas analizadas, se identificaron las siguientes características. Las personas tienen un promedio de vivir en su vivienda de 4 años. En cuanto a la orientación de las viviendas (ver tabla 3) el 48 % está orientada al norte, el 28 % al sur, el 9 % al poniente y por último el 15 % al oriente.

**Tabla 3.** Orientación de viviendas analizadas.

Orientación	Número de viviendas
Norte	26
Sur	15
Poniente	5
Oriente	8

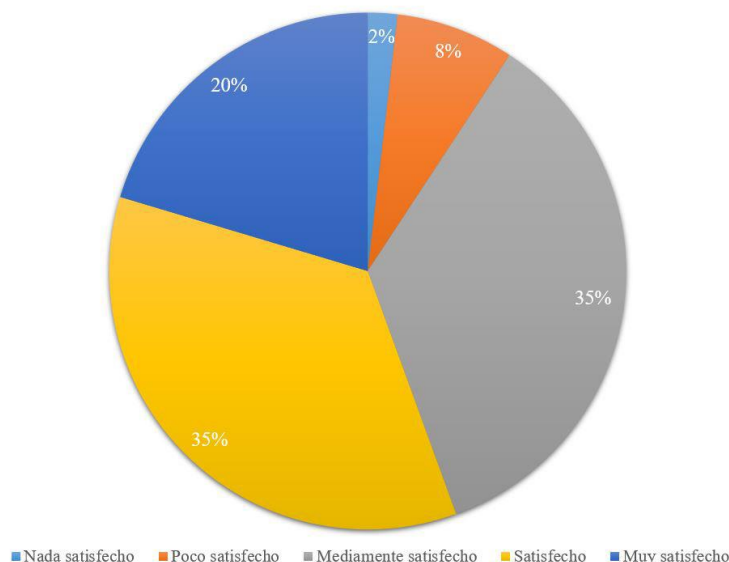
Fuente: Elaboración propia.

### 3.1 Habitabilidad psicosocial

El primer apartado del cuestionario aplicado fue para conocer la percepción psicosocial del habitante en su vivienda, los resultados obtenidos fueron los siguientes. A la pregunta ¿qué tan satisfecho se encuentra con su vivienda? La mayoría de los encuestados dieron una respuesta positiva el 72% contestó de medianamente satisfecho a muy satisfecho (ver figura 4).



¿Qué tan satisfecho se encuentra con su vivienda?



**Figura 4.** Sentimiento de satisfacción por la vivienda. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, a la pregunta de si tuviera la oportunidad ¿cambiaría de residencia? El 39 % respondió que nunca, el 13 % casi nunca, el 15 % regularmente, el 9 % casi siempre y el 24 % siempre. Con estos resultados se puede comprobar que más de la mitad de los encuestados no tiene intenciones de cambiar de residencia. Este es un aspecto positivo al mitigar la problemática de abandono de vivienda que persisten en el país.

Por otro lado, se les preguntó ¿qué representa para usted su vivienda? Los encuestados respondieron en un 56 % patrimonio, 33 % descanso, 7 % orgullo y 4 % seguridad. A la pregunta expresa de ¿considera que su vivienda es segura? los encuestados respondieron en un 43 % siempre, el 28 % casi siempre, el 11 % nunca y regularmente y el 7 % casi nunca. Esto indica que existe en más de la mitad de los encuestados una percepción de seguridad, es decir, la vivienda les genera un sentimiento protección y seguridad, indicador importante dentro del concepto de habitabilidad. Sin embargo, mencionaron que el fraccionamiento era inseguro.

Por último, se les preguntó ¿qué le gustaría que tuviera su vivienda? El 65 % indicó que más espacio, el 21 % mayor seguridad, el 8 % mejor temperatura ambiente y 6 % mayor privacidad. El aspecto de reducir al mínimo los espacios por parte de las instituciones de vivienda del país queda de manifiesto como algo negativo, hace que las personas tiendan a requerir más espacio para realizar las actividades cotidianas más funcionales en sus viviendas.

El 37 % de los encuestados tienen una tendencia positiva al sentirse entre muy satisfechos y satisfechos por su vivienda, el 35 % una tendencia neutral, y el otro 28 % tiene a una tendencia negativa al sentirse entre nada y poco satisfecho.

En términos generales existe una satisfacción y orgullo por la vivienda, los argumentos que los encuestados expresaron fueron que es un bien inmueble que adquirieron con su crédito inmobiliario y trabajo, y aunque el fraccionamiento se ubica en relativa lejanía con

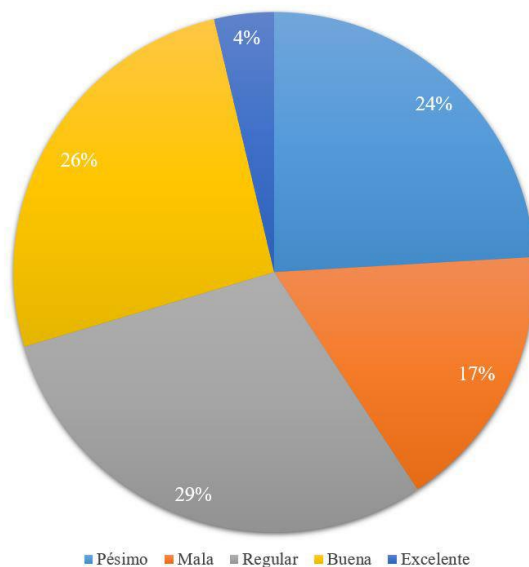


respecto a los centros de trabajo y de estudio de la ciudad, existían pocas oportunidades para seleccionar uno que estuviera dentro de sus posibilidades. Aunado a esto, sienten la seguridad de tener un patrimonio para sus descendientes. Así mismo, en su mayoría, expresaron sentir orgullo por su vivienda. En general, los encuestados eran personas con familias recién formadas y pequeñas, al ser apenas una familia en consolidación es entendible que se expresaran hacia su vivienda como un lugar cómodo, acogedor y tranquilo.

### 3.2 Habitabilidad espacial

Para conocer la percepción del habitante de la habitabilidad espacial, se les cuestionó sobre ¿cómo consideraban el tamaño de su vivienda para albergar a su familia? El 41 % de las personas demostró una tendencia negativa al percibir el espacio insuficiente, mientras que un 30 % tuvo una tendencia positiva (ver figura 5).

¿Cómo considera el tamaño de su vivienda para albergar a su familia?



**Figura 5.** Tamaño de la vivienda. Fuente: Elaboración propia

Al momento de preguntarles si tenían intención de realizar una ampliación a futuro, el 53 % respondió que sí, el 40 % que tal vez y el 7 % que no. Se observa que los espacios diseñados en las viviendas son percibidos por las personas que los habitan de manera negativa, esto es un indicador para el abandono de las viviendas. Es necesario que la normatividad utilizada por los institutos que diseñan las políticas de vivienda en México realice una revisión ante los estándares mínimos establecidos para las viviendas sociales construidas en México, es pertinente revisar y en su caso aumentar los metros cuadrados mínimos de construcción permitidos al 2022, debido a que

inciden negativamente en los aspectos de habitabilidad.

La teoría marca que al contar con mayor número de espacios se tendrá la posibilidad de disponer de mayor diversidad de escenarios y permitir el desarrollo particular de cada habitante, por el contrario, la ley de vivienda menciona que lo básico se limita a una cocina, un espacio de recreación, dos cuartos, baño y patio de servicio. Es con lo anterior descrito acerca de la percepción, donde se comprueba que las necesidades del usuario van más allá de las marcadas por leyes, normativas o reglamentos de construcción. Se debe diseñar no para muchos





metros cuadrados o grandes espacios, sino que los espacios mínimos tengan las dimensiones apropiadas para desarrollar las diferentes actividades de forma confortable apelando a los factores presentes de los indicadores de la habitabilidad.

### 3.3 Habitabilidad térmica

El siguiente apartado del cuestionario se trabajó sobre la habitabilidad térmica, principalmente la percepción de la temperatura, a los encuestados se les preguntó cómo sentían el clima en ese momento en específico y se separó según la orientación de la fachada (ver figura 6).

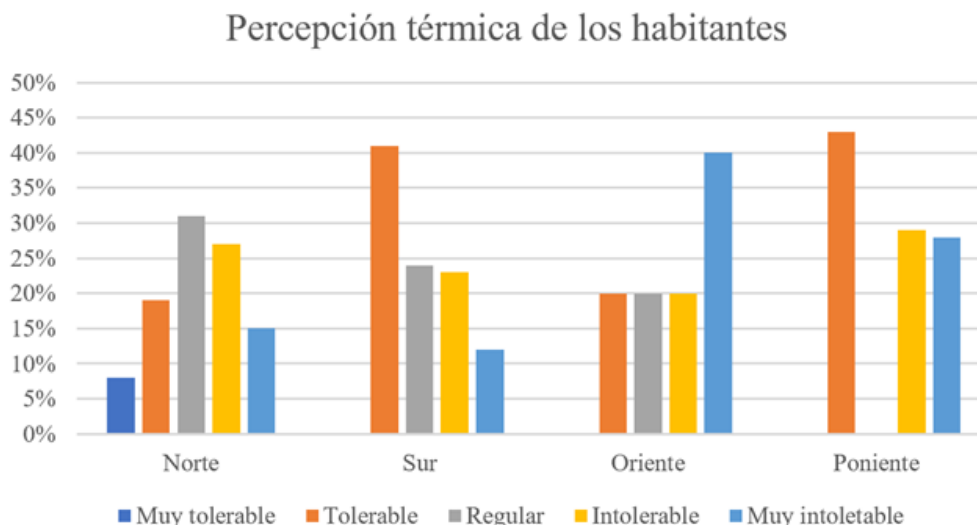


Figura 6. Tipo de orientación y percepción térmica. Fuente: Elaboración propia

Las fachadas que tienen orientación sur la mayoría de los encuestados la calificaron de regular a tolerable, es decir que, esta orientación es la mejor a la hora de diseñar las viviendas. Y la fachada poniente la mayoría la califico de intolerante a muy intolerante. Es preciso señalar que es importante tomar en cuenta las orientaciones a la hora de diseñar los espacios para las viviendas, puesto que el confort térmico incide en el gasto de energía eléctrica al tener que utilizar sistemas de enfriamiento activos. Sin embargo, los desarrollos inmobiliarios muy pocas veces toman en cuenta este criterio y se siguen construyendo viviendas con las peores orientaciones.

Por otro lado, las mediciones de estrés térmico se pudo encontrar otros datos (figura 7), para ello se

dividió en tres zonas de confort, ya que, la teoría [37] establece que el confort se encuentra dentro de los 18 °C a los 24 °C (cuadro rojo), solamente cuatro viviendas se situaron dentro de la zona. Por otra parte, la norma mexicana NOM-015-STPS-2001 [27] establece la zona de confort térmica dentro de los 36 °C a los 38 °C (cuadro azul), todas la viviendas se encontraron debajo de la zona de confort, y por último, los resultado arrojados con base en la fórmula de Steven Szokolay, con la cual se calculó el rango exacto para la ciudad de Culiacán fue de 23 °C a 28 °C (cuadro verde), 44 viviendas se localizaron dentro de este rango y seis sobrepasan la zona de confort tanto de la teoría como de la fórmula de Steven Szokolay.



**Figura 7.** Monitoreo *in situ* del estrés térmico. Fuente: Elaboración propia.

Es importante observar entonces, el contraste en lo respondido por las personas, ellas mencionaron en su mayoría que las viviendas eran muy calientes e intolerables, sin embargo, la medición marcó que más de la mitad se encuentra dentro del rango de confort establecido por Steven Szokolay, entonces para establecer un rango real de la zona de confort térmico para la ciudad de Culiacán, debe considerarse el 70 % de humedad relativa con la sensación térmica del habitante. Es pertinente también, hacer una revisión de la zona de confort estipulada por la norma mexicana NOM-015-STPS-2001 [27], pues está muy desfasada de las utilizadas a nivel internacional.

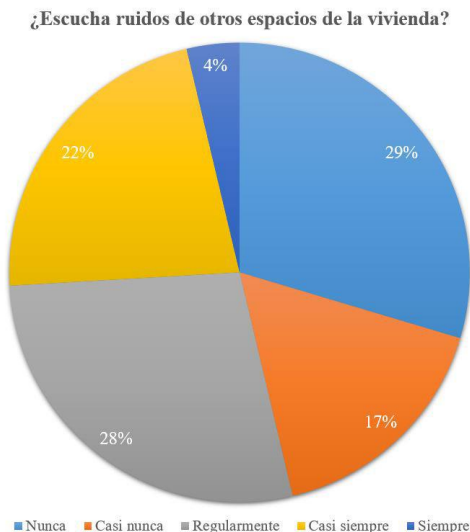
Las mediciones realizadas indican que el 74 % de las viviendas medidas, se localizaron dentro del confort térmico calculado para la ciudad de Culiacán, sin embargo, los encuestados mencionaron que, por el clima extremadamente caluroso de la ciudad, tienen que estar todo el día con el aire acondicionado prendido para poder realizar sus actividades cotidianas sin esfuerzo

mayor, y más del 65 %, dijo mantenerlo en 22 °C a 24 °C, rangos que marca la teoría.

Sumando los tres factores, humedad relativa, velocidad del viento dentro de la vivienda y la temperatura, las viviendas si presentan un nivel de habitabilidad térmica baja y, aunque la percepción del habitante hacia esta se esperaba encontrar de manera positiva, no fue así, pues consideran su morada muy caliente e intolerable en tiempo de calor, pero agradable en tiempo de frío.

### 3.4 Habitabilidad acústica

La habitabilidad acústica se analizó a partir de la percepción, la primera pregunta realizada fue acerca de los ruidos interiores en específico ¿escucha ruidos de otros espacios de la vivienda? (ver figura 8), En este sentido, las respuestas se inclinaron a que el 54% de los encuestados escucha los ruidos de las actividades realizadas en los otros espacios de su vivienda. Esto genera un grado de incomodidad y disminuye la privacidad dentro de su morada.

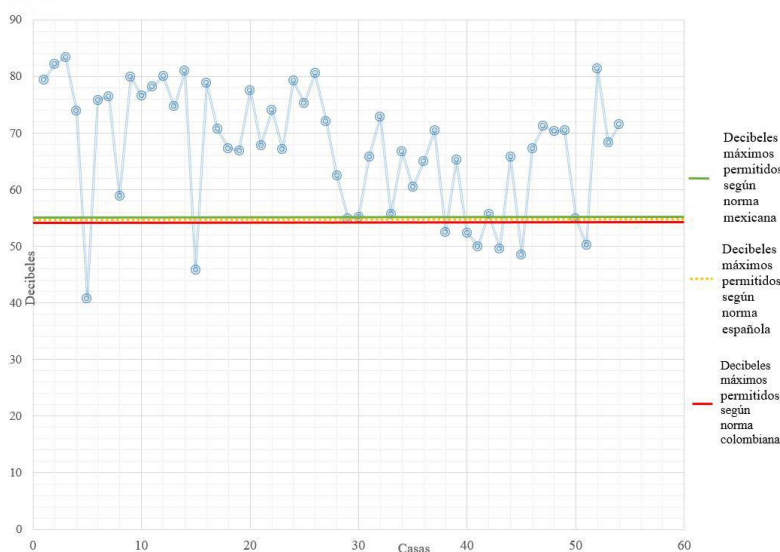


**Figura 8.** Percepción de ruidos del interior de la vivienda. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, se preguntó por los ruidos del exterior de la vivienda, el 20 % mencionó que siempre escucha ruidos externos, el 22 % que casi siempre, el 19 % regularmente, 17 % que casi nunca mientras que el 22 % dijo nunca escucharlos. Al momento de preguntarles la intensidad de los ruidos, respondían que los de la calle eran muy intensos, y los de otras viviendas de moderados a leves.

El último paso fue realizar la medición del ambiente acústico (ver figura 9), el resultado en este tipo de habitabilidad es preocupante, pues la

norma mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994 [30], la española BOE-A-2007-18397 [24] y la colombiana Norma Nacional de Emisión de Ruido y Ruido Ambiental [25], indica que el límite máximo permisible en zona habitacional debe estar entre los 50 decibeles (dB) de 22:00 a 6:00 horas y de 55 dB de 6:00 a 22:00 horas. En este sentido, en las viviendas se observó que solamente 11 de ellas se encontraron dentro del límite máximo permitido, el 80 % de las viviendas superan los estándares de decibeles máximos permitidos.



**Figura 9.** Monitoreo *in situ* de niveles de sonido (dB). Fuente: Elaboración propia.



Cabe aclarar, que esta medición fue realizada en un momento específico (levantamiento de la encuesta), se tendría que realizar un levantamiento de decibeles por horario para comprobar más específicamente si la vivienda cumple con la habitabilidad acústica todo el día. Finalmente, los habitantes mencionaron que preferirían no escuchar ningún ruido interior para contar con mayor privacidad y que los exteriores fueran menos intensos. Estos datos pueden ayudar para mejorar el aislamiento acústico de las viviendas tanto de ruidos puntuales al interior como exterior. Los sistemas constructivos que actualmente se están empleado por parte de los desarrolladores inmobiliarios limitan o imposibilitan la capacidad de aislamiento acústico de las viviendas. Estos factores impactan en la salud de las personas.

### 3.5 Habitabilidad lumínica

Por último, en el apartado de la habitabilidad lumínica se realizaron preguntas sobre la percepción de la luz durante todo el día y esta se comparó con la medición real de luxes emitidos en el espacio. En cuanto a la percepción, se les hizo una pregunta a los encuestados de ¿Cómo considera la luz natural en general en la vivienda? (ver figura 10), en este sentido las respuestas tuvieron un enfoque positivo puesto que el 45 % contestó que buena y el 39 % que excelente.

¿Cómo considera la luz natural en general en la vivienda?

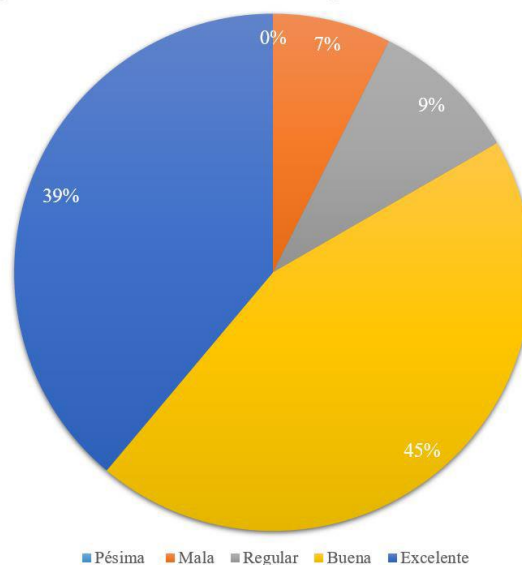


Figura 10. Percepción de luz natural en la vivienda. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el uso de luz artificial (ver figura 11) por los habitantes se desarrolló de la siguiente manera, el 40 % comentó que la utilizan por la tarde noche, el 34 % por la noche. Se puede apreciar que la mayoría solo encendían las luces en la tarde o noche, horario que es indispensable el uso de este tipo de iluminación, Sin embargo, en el día muy pocos la utilizan debido a que la iluminación del espacio es buena.

¿En qué horarios utiliza la luz artificial?

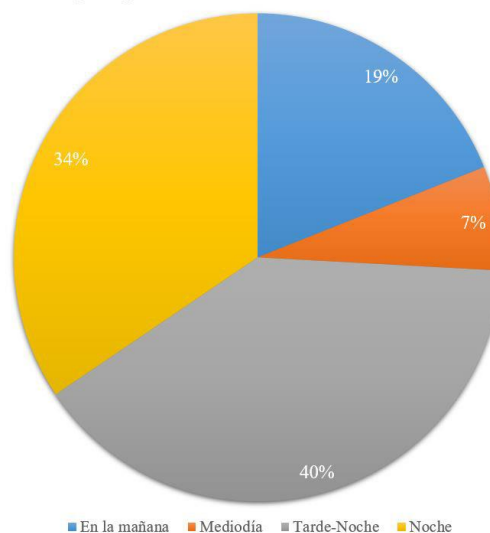


Figura 11. Utilización de luz artificial en la vivienda. Fuente: Elaboración propia.



Sin embargo, al observar los datos medidos (ver figura 12), se determinó que solo seis viviendas rebasaron los 100 luxes mínimos establecidos por las normas NOM-025-STPS-2008 [29], EN 12464-1 [26], Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público [39] y Reglamento de Construcciones para el municipio de Culiacán, Sinaloa [40]. Es decir que a pesar de

que las personas perciben como bien iluminadas sus viviendas los datos levantados muestran lo contrario. Una buena iluminación sobre todo natural permite realizar las actividades cotidianas de una manera más eficiente y limita el uso de iluminación artificial por lo tanto ahorro energético y económico.

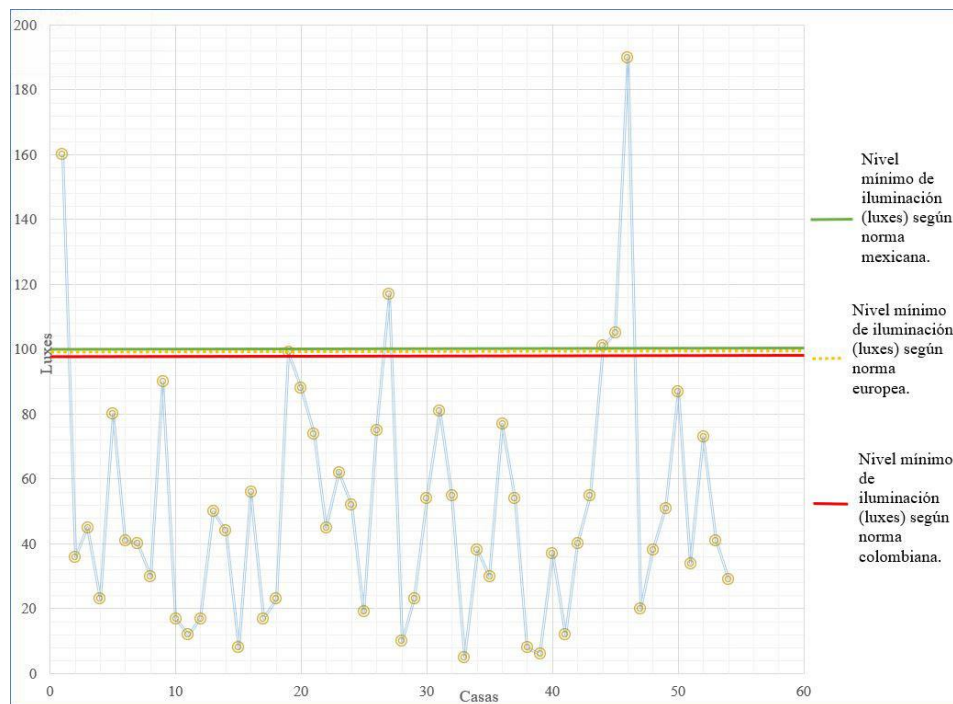


Figura 12. Niveles iluminación (luxes). Fuente: Elaboración propia.

Las viviendas son deficientes en cuanto a la iluminación natural, menos del 3 % cumple con los rangos requeridos de iluminación, este aspecto impacta negativamente a la habitabilidad de la vivienda y sobre todo al usuario, a pesar de que este la percibe como bien iluminada, sin embargo, para realizar sus actividades cotidianas debe hacer un esfuerzo extra a su visión, impactando negativamente a la habitabilidad de la vivienda, pero sobre todo en la salud de los habitantes de las viviendas.

#### 4. Conclusiones

Las políticas de vivienda social en México en los últimos 30 años con respecto a 2021 se han enfocado a dos temas principalmente, primero aumentar considerablemente la construcción de vivienda social a lo largo del país y por otro, establecer lineamientos y normativas en cuantos a los espacios que debe tener una vivienda y son cada vez más reducidos, llegando a establecer medidas mínimas que muchas de las ocasiones limitan las actividades que pueden desarrollarse en estos. Eso ha traído como consecuencia la falta de implementación de factores o aspectos relacionados con la habitabilidad en estas





edificaciones. Las personas que pueden acceder a los créditos para la compra de estas viviendas al poco tiempo le están haciendo modificaciones para aumentar los metros cuadrados de construcción y hacer los espacios más confortables, como marcan los resultados de este estudio hay una tendencia a percibir los espacios insuficientes o limitados.

Es pertinente la creación de políticas integrales de vivienda, donde a la vivienda se le distinga como un objeto habitable no simplemente un objeto de venta es importante incluir los aspectos culturales, económicos, políticos, sociales, espaciales y arquitectónicos, para garantizar una vivienda digna como lo establece la Constitución Mexicana.

Por otra parte, las normas tanto internacionales como mexicanas son muy específicas acerca de los niveles requeridos, también en cuanto a la medición de los diferentes factores relacionados con el confort ambiental, cómo y con que debe ser tomadas las mediciones de temperatura, luz y sonido, sin embargo, estos parámetros han sido establecidos para los centros de trabajo, es decir, existe un hueco normativo en lo que respecta a las condiciones ideales y confortables de las viviendas a partir de la habitabilidad térmica, acústica y lumínica. También es pertinente hacer una revisión en cuanto a la normativa de condiciones térmicas puesto que los parámetros establecidos son sumamente permisibles.

En cuanto a los estudios relacionados con la habitabilidad, ha habido un aumento en los últimos años en la implementación estudios y de metodologías tanto a nivel internacional como nacional, es importante que se continúe con este tipo de investigaciones, sin embargo, es oportuno tomar en cuenta la diversidad y diferencias entre las regiones, y evitar seguir homogenizando la vivienda, es preciso diseñar y construir a partir de la diversidad. Así mismo, los estudios deben dar pautas a los funcionarios y desarrolladores para que sean tomados en cuenta los puntos de vista

de los usuarios, investigadores y académicos, y a partir de estos se diseñen, desarrollen y construyan viviendas y entornos desde la perspectiva de la habitabilidad.

Con los resultados obtenidos en esta investigación se pudo observar que los encuestados sienten satisfacción y orgullo por su vivienda, por considerarla un patrimonio familiar. También se sienten seguros en ellas. Sin embargo, la percepción de los espacios se encontró una tendencia a calificarlos negativamente, es decir, una opinión desfavorable sobre la amplitud de los espacios, los cuales fueron diseñados con los requerimientos mínimos. Pero a pesar de esta opinión la mayoría opinó por no querer cambiar de vivienda, en lugar de eso, prefieren hacer ampliaciones futuras, para adaptar los espacios a sus actividades cotidianas. En las cuestiones técnicas como térmica, acústica y lumínica se observó que la mayoría de las viviendas no alcanzaron los estándares para tener viviendas confortables. A partir de lo antes descrito, se puede argumentar que se están diseñando y construyendo viviendas que no alcanzan los paradigmas establecidos por la habitabilidad. Sin embargo, se sigue desarrollando este tipo de vivienda al no tener una normativa que pugne por mejorar esta situación.

La metodología implementada en este estudio puede ser replicada en diferentes tipos de vivienda, no está limitada a la vivienda social. El aspecto temporal para el levantamiento de datos en la cuestión térmica, acústica y lumínica pudiera ampliarse más en futuras investigaciones y abarcar épocas de clima críticos, desafortunadamente en esta investigación no se pudo realizar por cuestiones económicas. Queda abierta la posibilidad de hacer comparaciones en diferentes épocas del año y enriquecer el conocimiento sobre la habitabilidad. Finalmente, con este estudio se pudo conocer y entender desde el aspecto psicosocial, espacial y técnico, las características de la habitabilidad de las



viviendas sociales en la ciudad de Culiacán, Sinaloa.

## 5.- Reconocimiento de autoría

*Carolina Barraza-Bracamontes:* Conceptualización, Metodología, Análisis formal, Investigación, Escritura - Borrador original, Supervisión, Administración de proyecto y Adquisición de fondos. *Yazmin Paola Ñiguez-Ayón:* Conceptualización, Escritura: revisión y edición, Visualización, Supervisión. *César Domingo Ñiguez-Sepúlveda:* Conceptualización, Investigación, Escritura: revisión y edición, Supervisión, Administración de proyecto y Adquisición de fondos. *Gonzalo Bojórquez Morales:* Conceptualización, Metodología, Análisis formal y Escritura: revisión y edición.

## Referencias

- [1] M. E. Castro, "Habitabilidad, medio ambiente y ciudad" en 2º Congreso Latinoamericano: El habitar. Una orientación para la investigación proyectual, México, Universidad Autónoma Metropolitana, 1999.
- [2] M. Casals-Tres, J. Arcas-Abella y A. Cuchí, "Aproximación a una habitabilidad articulada desde la sostenibilidad. Raíces teóricas y caminos por andar", *Rev. Invi*, vol. 28, no. 77, pp. 193-226, 2013. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582013000100007>
- [3] J. Montejano, C. Caudillo, y M. Cervantes, "Vivienda de interés social, segregación residencial y accesibilidad: análisis de 121 conjuntos urbanos en el arco nororiente del Valle de México, 2001-2010", *Rev. Estudios demográficos y urbanos*, vol. 33, no. 1(97), pp. 187-224, 2018. <https://doi.org/10.24201/edu.v33i1.1639>.
- [4] INEGI, "Censo de Población y Vivienda 2010", 2010, <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html>
- [5] INEGI, "Censo de Población y Vivienda 2020", 2020, <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- [6] Crónica Jalisco, Deficientes 35% de las viviendas de interés social en México: BID. [En línea]. Disponible en: <http://www.cronicajalisco.com/notas/2015/44611.html>. [Accedido: 18 mayo 2017].
- [7] R. Cruz, J. de Hoyos y A. Villar, "Análisis de la política pública hacia la habitabilidad de la vivienda en México", Teoría, impactos externos y políticas públicas para el desarrollo regional. 1ª ed. México: UNAM y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, 2018, pp. 496-521. <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/79804/2017-Cap%20c3%a1tulo%20de%20libro-Amecider-Cruz-De-Hoyos-Villar-Amecider.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accedido : 10 de marzo 2019].
- [8] P. Blas, "Las ruinas que dejó el boom de la vivienda popular en México". *Magis*. [En línea]. Disponible en: <https://magis.iteso.mx/nota/las-ruinas-que-dejo-el-boom-de-la-vivienda-popular-en-mexico/> [Accedido: 16 de marzo 2019].
- [9] J. Sánchez, "La vivienda social en México. Pasado, Presente y Futuro". 1ª ed. México: JSa, 2012.
- [10] L. Velasteguí, M. Vanga, y J. Velasteguí, "Conjunto habitacional de interés social para el barrio San Antonio en Riobamba. Análisis de factibilidad", *Rev. Chakiñan de Ciencias Sociales y Humanidades*, no. 7, pp. 40-57, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rchakin/n7/2550-6722-rchakin-07-00040.pdf>. <https://doi.org/10.37135/chk.002.07.04>
- [11] Y. Castaño-Pineda, S. Atehortúa-Mira, y Y. López-Arango "Condiciones socio-habitacionales y morbilidad percibida de desplazados internos residentes en viviendas de interés social en Turbo, Antioquia", *Rev. Ciencias de la Salud*, vol. 16, no. 2, pp. 237-261. 2018. <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/revsalud/a.6768>



- [12] V. Moctezuma, "Experiencias y significados simbólicos de los habitantes de conjuntos urbanos de interés social en México: segregación diferencia y distinción", *Rev. Estudios demográficos urbanos*, vol. 32, no. 3, pp. 487-514, 2017. <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1723>
- [13] W. Giraldo, y C. Herrera, "Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial", *Rev. Ingeniería y Desarrollo urbanos*, vol. 35, no. 1, pp. 77-101, 2017. <https://doi.org/10.14482/inde.35.1.8944>
- [14] M. Palme, C. Carrasco-Aldunate, y M. Gálvez, "Estimación del riesgo de sobrecalentamiento y del potencial de refrigeración por ventilación natural de viviendas unifamiliares en ciudades costera de Chile", *Rev. Hábitat Sustentable*, vol.6, no. 2, pp. 52-61, 2016. <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2621>.
- [15] R. García, R. Herrera, C. Muñoz, y G. Wandersleben, "Desempeño ambiental de recintos habitacionales. *Tecnura*" vol. 20, no. 47, pp. 71-84, 2016. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.1.a06>
- [16] C. Espinosa, A. Cortés, "Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante", *Rev. INVI*, vol. 30, no. 85, pp. 227-242, 2015. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582015000300008>
- [17] G. Hernández, y S. Velásquez, "Vivienda y calidad de vida. Medición del hábitat social en el México Occidental", *Rev. Bitácora Urbano Territorial*, vol. 24, no. 1, pp. 149-166, 2014. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/biut/v24n1/0124-7913-biut-24-01-149.pdf> [Accedido: 17 de junio 2017].
- [18] A. M. Landáruzi Mendoza, S. J. Mercado Doméch, "Algunos factores físicos y psicológicos relacionados con la habitabilidad interna de la vivienda", *Rev. Medio Ambiente y comportamiento Humano*, vol. 5, no. 1 y 2, pp. 89-113, 2004. [En línea]. Disponible en: [https://mach.webs.ull.es/PDFS/Vol5\\_1y2/VOL\\_5\\_1\\_y2\\_e.pdf](https://mach.webs.ull.es/PDFS/Vol5_1y2/VOL_5_1_y2_e.pdf)
- [19] M. Torres, "Habitabilidad de la vivienda mínima y las ciudades en pandemia mundial: COVID-19 en Mérida, México", *Rev. INVI*, vol. 65, no. 102, pp. 352-383, 2021. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582021000200352>
- [20] R. Melchor, "La adaptabilidad de la habitabilidad al covid-19", *Rev. Topofilia*, no. 22, pp. 204-216, 2021. Disponible en: <http://69.164.202.149/topofilia/index.php/topofilia/article/view/176>. [Accedido: 9 de agosto 2021].
- [21] A. Saldarriaga, "Habitabilidad". Bogotá: Escala Fondo Editorial, 1981.
- [22] A. Mues, "Habitabilidad y desarrollo urbano sostenibles", (Tesis de maestría), Instituto tecnológico de Monterrey, Ciudad de México, México, 2011. Disponible en: <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/632039>
- [23] ISO 7243, International Organization for Standardization (ISO), Hot environments - Estimations of the heat stress on working man, based on the WBGT- index (Wet Bulb Globe Temperature), 2017. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:7243:ed-3:v1:en>
- [24] Boletín Oficial del Estado [DOE], "Real Decreto 1367/2007", 2007. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-18397> [Accedido: 20 de octubre 2017].
- [25] Diario Oficial [DO], "Norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental", 2006. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=19982> [Accedido: 20 de octubre 2017].
- [26] Asociación española de normalización y certificación [AENOR], "EN 12464-1", 2003. [https://enerfigente.files.wordpress.com/2015/08/une-en\\_12464-12003.pdf](https://enerfigente.files.wordpress.com/2015/08/une-en_12464-12003.pdf) [Accedido: 20 de octubre 2017].
- [27] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-015-STPS-2001", 2002. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=728016&fecha=14/06/2002](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=728016&fecha=14/06/2002) [Accedido: 20 de octubre 2017].



[28] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-011-STPS-2001", 2002. <http://asinom.stps.gob.mx:8145/upload/noms/Nom-011.pdf> [Accedido: 20 de octubre 2017].

[29] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-025-STPS-2008", 2015. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5304572&fecha=20/08/2015](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5304572&fecha=20/08/2015) [Accedido: 20 de octubre 2017].

[30] Diario Oficial de la Federación [DOF], "NOM-081-SEMARNAT-1994", 2013. [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5324105&fecha=03/12/2013](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5324105&fecha=03/12/2013) [Accedido: 20 de octubre 2017].

[31] Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI). "Código de edificación de vivienda 2010". [En línea] Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/85460/Codigo\\_de\\_Edificacion\\_de\\_Vivienda.pdf.2010](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/85460/Codigo_de_Edificacion_de_Vivienda.pdf.2010)

[32] R. Hernández, C. Fernández, y M. Baptista, Metodología de la Investigación. 6ta ed. México: McGrawHill, 2014.

[33] S. Aguilar-Barojas, "Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud", Rev. Salud en Tabasco, No. 1-2, pp. 333-338, 2005. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/487/48711206.pdf> [Accedido: 9 de marzo 2018].

[34] G. Gómez-Azpeitia, G. Bojórquez, P. Ruiz, R. Romero, J. Ochoa, M. Pérez, O. Reséndiz, y A. Llamas, "Comfort temperatures inside low-cost housing: Case: Six warm climate cities in Mexico", 2009. Disponible

en: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84855609370&origin=inward&txGid=40770937889318a3af37adb791956776>.

[35] G. Bojórquez, "Confort Térmico en espacios Exteriores: Actividades en Espacios Recreativos, en clima Cálido Seco Extremo", Ph.D. dissertation, Universidad de Colima, Colima, 2010. <https://doi.org/10.5821/ctv.7639>

[36] ASHRAE, "Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy", 2004.

[37] INSHT NTP 322, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT", 1993. <https://www.insst.es/documents/94886/326827/ntp322.pdf/065f600d-b29e-45cd-9d4a-595ce78a0110> [Accedido: 20 de octubre 2017].

[38] V. Olgyay, Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili, 2004.

[39] Diario Oficial [DO], "Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público", 2010. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/20729-7853.pdf> [Accedido: 20 de octubre 2017].

[40] Periódico Oficial el estado de Sinaloa [POES], "Reglamento de construcciones para el municipio de Culiacán, Sinaloa", 2007. Disponible en: <https://www.culiacan.gob.mx/wp-content/uploads/2018/10/Reglamento-de-Construcciones-para-el-Municipio-de-Culiac%C3%A1n.pdf> [Accedido: 20 de octubre 2017]



Derechos de Autor (c) 2022 Carolina Barraza-Bracamontes, Yazmin Paola Íñiguez-Ayón, César Domingo Íñiguez-Sepúlveda, Gonzalo Bojórquez -Morales



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

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

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

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






# La formación del personal de mantenimiento para la industria 4.0

## *The training of maintenance personnel for industry 4.0*

Patricia Avitia-Carlos , Alex Bernardo Pimentel-Mendoza , José Luis Rodríguez-Verduzco , Bernabé Rodríguez-Tapia 

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 

**Autor de correspondencia:** Patricia Avitia Carlos, 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. E-mail: [patricia\\_avitia@uabc.edu.mx](mailto:patricia_avitia@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0001-9448-7558.

Recibido: 20 de Septiembre del 2021

Aceptado: 5 de Diciembre del 2022

Publicado: 7 de Diciembre del 2022

**Resumen.** - *La industria 4.0 (I4.0) se caracteriza por la incorporación de tecnologías digitales a los procesos de manufactura, dotándolos de flexibilidad y capacidad de adaptación en tiempo real. El desarrollo de este tipo de industria se considera un factor competitivo a nivel mundial. Sin embargo, el sostenimiento de la I4.0 requiere la presencia de personal técnico competente capaz de llevar a cabo tareas de mejora y mantenimiento a sistemas de manufactura de alta digitalización. La zona conurbada de Tijuana-Tecate alberga industria manufacturera de los sectores electrónico, biomédico y aeroespacial, entre otros. La presencia de esta industria es fundamental dentro de las actividades económicas de la región. El objetivo del trabajo consistió en identificar las necesidades de formación asociadas al ejercicio efectivo de actividades de mantenimiento del personal técnico y de ingeniería que labora en empresas locales; así como las estrategias que éstas siguen para reentrenar y actualizar a dicho personal. En el presente trabajo de corte exploratorio, se realiza una revisión documental en cuanto a las habilidades técnicas requeridas para el desarrollo y sostenimiento de Industria 4.0, seguida de una entrevista semiestructurada a cinco miembros de la industria local responsables de áreas de mantenimiento industrial. El instrumento indagó dimensiones como tecnologías 4.0 empleadas, disponibilidad local de personal cualificado, competencias requeridas, esquemas internos de formación y estrategias para la retención y desarrollo del personal. A partir de los resultados puede observarse que las empresas entrevistadas no realizan colaboraciones con los programas educativos formales para atender las necesidades de capacitación y actualización del sector. Se identifica además un retraso en la implementación de tecnologías de industria 4.0 en la industria local y la predominancia de modelos tradicionales de mantenimiento, ya que solamente una empresa reporta el empleo de mantenimiento basado en la confiabilidad. El trabajo futuro consiste en ampliar el estudio enfocándolo en un solo sector de la industria de manufactura y realizando entrevistas a profundidad encaminadas al diseño de actividades conjuntas industria-academia para el registro de estándares de formación que deriven en la certificación de competencias específicas.*

**Palabras clave:** Industria 4.0; Formación técnica; Mantenimiento industrial.

**Abstract.** - *Industry 4.0 (I4.0) is characterized by the incorporation of digital technologies into manufacturing processes, giving them flexibility and the ability to adapt in real-time. The development of this type of industry is considered a competitive factor worldwide. However, the maintenance of I4.0 requires the presence of competent technical personnel capable of carrying out tasks of improvement and maintenance of highly digitized manufacturing systems. The Tijuana-Tecate metropolitan area is home to the manufacturing industry in the electronic, biomedical, and aerospace sectors, among others. The presence of this industry is fundamental to the region's economic activities. The objective of the work was to identify the training needs associated with the effective exercise of maintenance activities of technical and engineering personnel working in local companies; as well as the strategies they follow to retrain, and update said personnel. In this exploratory work, a documentary review is carried out regarding the technical skills required for the development and maintenance of Industry 4.0, followed by a semi-structured interview with five members of the local industry responsible for industrial maintenance areas. The instrument investigated dimensions such as 4.0 technologies used, local availability of qualified personnel, required skills, internal training schemes, and strategies for the retention and development of personnel. Results show that interviewed companies do not collaborate with education institutions to meet the training and updating needs of the sector. It is also identified a delay in the implementation of industry 4.0 technologies in the local industry and the predominance of traditional maintenance models since only one company reports the use of reliability-based maintenance. Future work consists of expanding the study focusing on a single sector of the manufacturing industry and conducting in-depth interviews aimed at designing joint industry-academia activities to register training standards that result in the certification of specific competencies.*

**Keywords:** Industry 4.0; Technical training; Industrial maintenance.



## 1. Introducción

El empleo de tecnologías digitales a lo largo de los procesos operativos para una integración vertical y horizontal de sistemas dentro de la empresa forma parte de lo que se ha denominado Industria 4.0 (I4.0). La I4.0 busca crear fabricas inteligentes, donde la integración de tecnologías digitales y computo analítico permita la comunicación máquina-máquina y máquina-humano [1]. Para ello, incorpora diversas tecnologías inteligentes, entre las cuales se encuentran los sistemas ciberfísicos, cómputo móvil, Internet de las cosas (IoT), Big Data e Inteligencia Artificial [2]. La función mantener se vuelve más compleja y requiere de un alto grado de especialización por parte del personal que la desempeña [3]. Por tanto, la digitalización de la I4.0 provee al departamento de mantenimiento de nuevas tecnologías, pero también de nuevos retos [4].

El mantenimiento constituye un factor global y económico dentro de la empresa. Generalmente es considerado parte de las operaciones, junto a la producción. Su gestión e implementación incide en la seguridad, productividad y calidad de la organización, siendo por tanto un factor crítico para su supervivencia y crecimiento. La industria moderna requiere del empleo de herramientas de mantenimiento rápidas e innovadoras para trabajar de modo eficiente [5]. Si consideramos adicionalmente el impacto que las tecnologías digitales han tenido en el mundo de los negocios y los procesos productivos; volviéndolos más dinámicos, globales y competitivos, observamos la necesidad de fortalecer la actividad de mantenimiento a fin de que se corresponda a estas necesidades. Por tanto, un área prioritaria de la I4.0 es la cooperación interdisciplinaria entre producción y mantenimiento, para alcanzar máxima eficiencia y generar sistemas de producción efectivos [6].

Si bien la I4.0 y las tecnologías que la constituyen han sido ampliamente abordados en la literatura

académica de la última década; los trabajos existentes se centran mayormente en las tecnologías involucradas y su impacto en procesos de manufactura particulares, sin observar a la organización y sus procesos de modo transversal [6]. Para [7] los cambios organizacionales son requeridos junto a los tecnológicos en el contexto de la I4.0. Sin embargo, existen pocas experiencias documentadas sobre la práctica corporativa y la implementación exitosa de I4.0 [8].

Asimismo, las implicaciones para el área de mantenimiento y su personal son escasamente referidas. La función de mantenimiento ha sido abordada con un enfoque centrado en la tecnología y eficiencia de la organización [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]; aunque es necesario mencionar que entre estas se identifican algunas referencias al papel del Operador 4.0 [17], [18]. Este enfoque ha dejado de lado los requisitos de formación y actualización del personal técnico de operaciones, así como los esquemas que pudieran brindar respuesta a estas necesidades.

El presente trabajo busca identificar la situación de la industria de manufactura regional en cuanto a requerimientos y desarrollo de habilidades técnicas de I4.0 del personal de mantenimiento. Para ello se ha organizado de la siguiente manera: en la primera sección se exhiben las características sectoriales de la industria de manufactura local; la segunda sección describe la metodología empleada; en la tercera sección se da cuenta de los resultados; finalmente, las conclusiones se presentan en la cuarta y última sección del documento junto a las limitaciones del estudio.

## 2. El contexto de la industria de manufactura en la región Tijuana-Tecate

Se presentan a continuación algunos indicadores que describen la importancia de la industria de



manufactura local, con la finalidad de proporcionar el contexto en el cual se abordan las necesidades de formación técnica en I4.0 de los trabajadores de mantenimiento actuales y prospectivos de la región Tijuana-Tecate.

Citando datos de INEGI, los autores González Torres et al [19] señalan que en 2011 el sector industrial en México representó el 36% del PIB nacional, correspondiendo el 50% al sector manufacturero. En el mismo año, el sector industrial representó el 34% del PIB del estado de Baja California, del cual el 66% perteneció a la manufactura. Se destaca la especialización industrial del estado, en la que destacan los productos electrónicos. Empero, los citados autores indican que, en términos de Pymes, la adopción de tecnología en el estado es muy baja; mostrándose una falta de interés en invertir por considerar que no proporcionan beneficios a corto plazo.

Como se ha mencionado, el sector electrónico posee la mayor concentración de empresas y empleo en la industria de manufactura de Baja California con un total de 190 plantas y alrededor de 80 mil empleos directos. En segundo término, el sector de dispositivos médicos con 70 plantas y alrededor de 60 mil empleos. A su vez, el sector automotriz concentra 80 plantas y 26 mil empleos; en tanto el sector aeroespacial tiene presencia con 70 empresas y cerca de 20 mil personas empleadas. En su estudio sobre las capacidades técnicas de la industria en Baja California, Carrillo et al concluyen que son los ingenieros, técnicos y gerentes el principal vehículo humano para implementar la I4.0 en la región [20].

De acuerdo con información del Ayuntamiento de Tijuana, en Baja California se tienen registrados 92 Parques Industriales, de los cuales 42 se encuentran establecidos en el municipio de Tijuana. En 2011 se registraron cerca de 152 mil

empleos, correspondiendo el 37% al sector de la Electrónica; 17% a los Productos Médicos; 15% el sector Metalmecánico; 11% el sector Automotriz; mientras que los sectores Plásticos y Aeroespacial representaron el 10.8% y el 8% respectivamente [21].

Más recientemente, en 2017 se registró una actividad del sector manufacturero para el estado de Baja California, con Tijuana en primer lugar con un 62.6 %, seguido de Mexicali con un 22.9 %, Ensenada con un 8.4 %, Tecate con un 3.8 % y por último Playas de Rosarito, con un 2.3% [22]. Esta información económica permite visualizar la relevancia del sector manufacturero para la región, así como el contexto de trabajo en que se desempeña el recurso humano de las áreas de mantenimiento industrial.

En cuanto a la oferta educativa de formación profesional, en la región se ubican actualmente diversas instituciones de educación superior tanto públicas como privadas que ofertan programas educativos del área de ingeniería. La oferta educativa de estas instituciones se orienta a cubrir las necesidades de profesionales del contexto regional, nacional e internacional, como es la actualización de contenidos acordes al desarrollo tecnológico existente y la formación integral del capital humano. Sin embargo, se enfrentan al reto del incremento en los costos derivado de las nuevas tecnologías y el escaso financiamiento público, por lo que los programas de ingeniería resultarían cada vez más costosos [23].

### 3. Metodología

Se desarrolló el presente estudio de tipo mixto y alcance exploratorio, con el objetivo de identificar las necesidades de formación del personal técnico y de ingeniería de empresas locales en la región Tijuana-Tecate de Baja



California, para la realización de actividades de mantenimiento relacionadas a la I4.0.

En primer término, se realizó una revisión documental en bases de datos electrónicas de sitios académicos como Scopus, Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos (IEEE), y Google Scholar con respecto a las habilidades técnicas requeridas para desarrollar I4.0. Los términos de búsqueda empleados incluyeron “Industry 4.0” y “maintenance” y “skills” o “jobs”; en el título de artículos de revisión publicados en idiomas inglés y español para un rango de 2015 a la 2021. Con este método se obtuvieron 34 trabajos iniciales que cumplían con los criterios de búsqueda. Los trabajos identificados fueron analizados para determinar si cumplían además con la orientación a las capacidades y habilidades técnicas de las personas en el contexto de trabajo de la I4.0. A estos resultados siguió una búsqueda complementaria de algunos trabajos que eran citados por los seleccionados. De los artículos se extrajeron las tecnologías, los conocimientos y habilidades que son considerados relevantes a la función mantener en la Industria 4.0 y se incluyeron en la construcción del instrumento de recolección de datos aplicado a responsables de mantenimiento.

Posteriormente se realizaron entrevistas semiestructuradas a cinco miembros de la industria local, responsables de áreas de mantenimiento industrial. Los sectores en los cuales se ubican las empresas de los participantes corresponden a: *i*) mueblero (M), *ii*) biomédico (B), *iii*) automotriz (A), *iv*) metalmecánica (MM) y *v*) de generación de energía (E). Se eligieron estas empresas por considerarse que representan adecuadamente a las industrias que se ubican en la región, de acuerdo con la información estadística presentada. Fue aplicado mediante Google Forms durante 2021; contó con 18 ítems e indagó dimensiones como las tecnologías 4.0

empleadas en la empresa, la estrategia de mantenimiento, percepción sobre la disponibilidad local de personal cualificado, competencias que son requeridas de acuerdo con las actividades de la empresa, esquemas internos de formación y estrategias para la retención y desarrollo del personal.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 El mantenimiento en la I4.0

En los ambientes tecnológicos modernos de la I4.0 se requiere de un alto nivel de confiabilidad del equipo y la planta, en lo cual el mantenimiento tiene un rol clave [13]. Por tanto, se le considera una de las áreas más importantes dentro de la industria de manufactura [6]. El mantenimiento se categoriza en distintos modelos conceptuales y operativos asociados con las políticas de la empresa: (i) correctivo o “run-to-failure”, (ii) preventivo, y (iii) predictivo. Actualmente, el mantenimiento industrial continúa siendo primordialmente correctivo y preventivo. Sin embargo, estas estrategias de mantenimiento no aprovechan la gran cantidad de datos que llegan a generarse en el piso de operaciones y que pueden estar disponibles a través de los sistemas informáticos de la empresa, con apoyo de tecnologías emergentes como IoT, Big Data, computo en la nube y analítica de datos [5].

La disponibilidad de herramientas digitales para la generación, recopilación y análisis de datos ha conducido a la transformación de los modelos tradicionales de mantenimiento en modelos predictivos [6] [7]. Los autores Busdekis et al consideran que las funciones de mantenimiento de tipo predictivo en la I4.0 incluyen la detección de anomalías, predicción de fallo y toma de decisiones sobre las acciones de mantenimiento [7]. El conjunto de acciones de detección, diagnóstico y pronóstico de tareas es conocido



como (Prognostics and Health Management o PHM) [1]. Esta técnica no solamente pronostica fallos futuros, sino que también observa la vida útil restante del equipo (Remaining Useful Life – RUL, por sus siglas en inglés) para la adecuada toma de decisiones [11]. El PHM es, junto al mantenimiento basado en condiciones (CBM), uno de los modelos de mantenimiento que han sido propuestos como resultado del empleo de estas tecnologías digitales [5] [4].

Por su parte, el CBM es una estrategia de mantenimiento predictivo que se emplea en plantas con procesos de manufactura automatizados [4], donde se busca mantener alta a la Eficiencia General de los Equipos (OEE). El uso de CBM en la I4.0 involucra tres etapas: monitoreo en tiempo real de condiciones, procesamiento de Big Data, determinación del tiempo de mantenimiento y su alcance [8]. Con ello, el intervalo de tiempo P-F se reduce hasta el punto de casi desaparecer gracias al acceso a la información en tiempo real y su consecuente análisis para extraer signos tempranos de fallo antes de que estos sean visibles a los humanos [7].

En general, el uso de componentes inteligentes con capacidad de autodiagnóstico y predicción de fallos se extiende dentro de la I4.0. Con ello se contribuye a la reducción de fallos y costos de operación, así como a la optimización de inventarios y la mejora de acceso al mantenimiento. Como se ha discutido, la I4.0 debe afrontar sistemas complejos y competitivos con seguridad, calidad, valor y costo mínimo. Por ello, el mantenimiento predictivo es un método de operación estratégico para asegurar la flexibilidad y evitar paros en las plantas inteligentes del futuro [6].

Mientras que las técnicas tradicionales de mantenimiento preventivo se enfocan en identificar y prevenir problemas futuros, el

mantenimiento predictivo (PdM) se aboca a la reducción de costos y prevención de fallas mediante la identificación exacta de las partes que son más probables de causar problemas, posibilitando así su reemplazo o reparación en el momento exacto [6]. El PdM recolecta datos de los procesos, pero también recoge aspectos físicos de la condición del equipo, como temperatura, presión, vibración, etc. Esta información se emplea para la identificación y detección temprana de fallos, y predicción de condición futura del equipo [8] [9].

Las tecnologías involucradas en el PdM pueden ser clasificadas en cinco categorías: sensores, redes, integración, inteligencia y comportamiento aumentados [8]. En esta integración de tecnologías el IoT es un pilar, ya que posibilita trasladar las acciones físicas de las maquinas en señales digitales. El IoT transmite continuamente los datos de los sensores y de otras fuentes, como los Controladores Lógicos Programables (PLC), terminales de los Sistemas de Ejecución de Manufactura (MES), Sistemas Computarizados de Gestión de Mantenimiento (CMMS), o Sistemas de Planificación de Recursos Empresariales (ERP) [1].

Los sistemas de mantenimiento predictivo en la I4.0 conllevan una serie de retos para la gestión de la organización. Estos son clasificados por Bousdekis et al como organizacionales, tecnológicos y económicos. Entre ellos se cuentan la inversión económica, la estrategia digital de la empresa, el liderazgo, la estructura organizacional, la administración de proyectos y el desarrollo de las habilidades digitales de los ingenieros [7].

A pesar de sus ventajas, el mantenimiento predictivo tiene desventajas que comparte con el CBM, entre las que se cuenta el que requiere de un alto nivel de inversión de capital y experiencia para la instalación y operación de equipo de





monitoreo, bases de datos de larga escala y sistemas de procesamiento y análisis de datos, cuyo desarrollo aún se encuentra en su infancia [6] [13]. A la fecha, el enfoque se ha centrado en el desarrollo de hardware y software para realizar las funciones de monitoreo, procesamiento y análisis de datos de componentes. Sin embargo, la implementación del programa de PdM en toda la organización impacta a diversos sectores incluido el de personal. Se requiere contar con los trabajadores capacitados que emplearán dichos sistemas inteligentes, así como ingenieros que puedan analizar el Big Data de los procesos de mantenimiento. Por ello, a pesar de las ventajas que un sistema de PdM presenta dentro de la I4.0, esto no significa que dicho modelo sea siempre la mejor política de mantenimiento, sino que representa la posibilidad de definir el sistema de mantenimiento óptimo para cada componente [1].

#### ***4.2 Retos para el personal de mantenimiento en la I4.0***

La I4.0 tendrá un impacto significativo en el mercado laboral y la sociedad, debido a que las tecnologías emergentes, y en particular la digitalización que caracteriza a la I4.0 tienen un importante efecto en los trabajos y la educación de los profesionales. La escasez de una fuerza de trabajo con habilidades técnicas acordes a la I4.0 constituye uno de los principales retos para su implementación, junto a los requerimientos de reentrenamiento del personal existente para afrontar las nuevas condiciones del entorno de trabajo [24].

Para [3] solamente los empleados altamente educados tendrán la capacidad para controlar dichas tecnologías y podría incluso esperarse la desaparición de varias profesiones. Los requerimientos de las empresas en cuanto a habilidades y formación de los empleados se incrementarán en estas industrias, al ser un factor clave para el éxito de las empresas altamente

innovadoras. Los requisitos de un trabajo digitalizado se incrementan debido a que los procesos se interconectan y se vuelven más complejos, particularmente en la intersección de las esferas de actividad técnica, organizacional y social de los procesos de trabajo. Por ende, la gestión de tareas de profesionales interdisciplinarias, como desarrollo, puesta en servicio, operación o mantenimiento, requiere además de una fusión de las formas de organización tradicionales [9].

Es evidente que de entre las funciones que se llevan a cabo dentro de la industria, la que cuenta con el mayor grado de interacción con las tecnologías empleadas, su operación y sostenimiento, es la de mantenimiento. El personal que labora en estas áreas requiere poseer conocimientos técnicos, de seguridad, organización y administración. Es por ello por lo que estos puestos de trabajo son los primeros que tendrán necesidad de desarrollar nuevas competencias y adaptarse al escenario de la I4.0.

Así, el perfil profesional habitualmente asociado a las áreas de mantenimiento (ingeniería mecánica, eléctrica, electromecánica y mecatrónica) tenderá a complementarse con habilidades asociadas actualmente a perfiles de las de tecnologías de la información, como ingenieros de software, especialistas en informática, programadores de PLC y robots, analistas de datos y especialistas en ciberseguridad [3].

#### ***4.3 La postura de los responsables de mantenimiento de la industria local***

Se realizó entrevista semiestructurada a cinco responsables de actividades de mantenimiento en la industria local, del sector mueblero (M), biomédico (B), automotriz (A), metalmecánica (MM) y de generación de energía (E). Los cinco participantes pertenecen al sexo masculino y



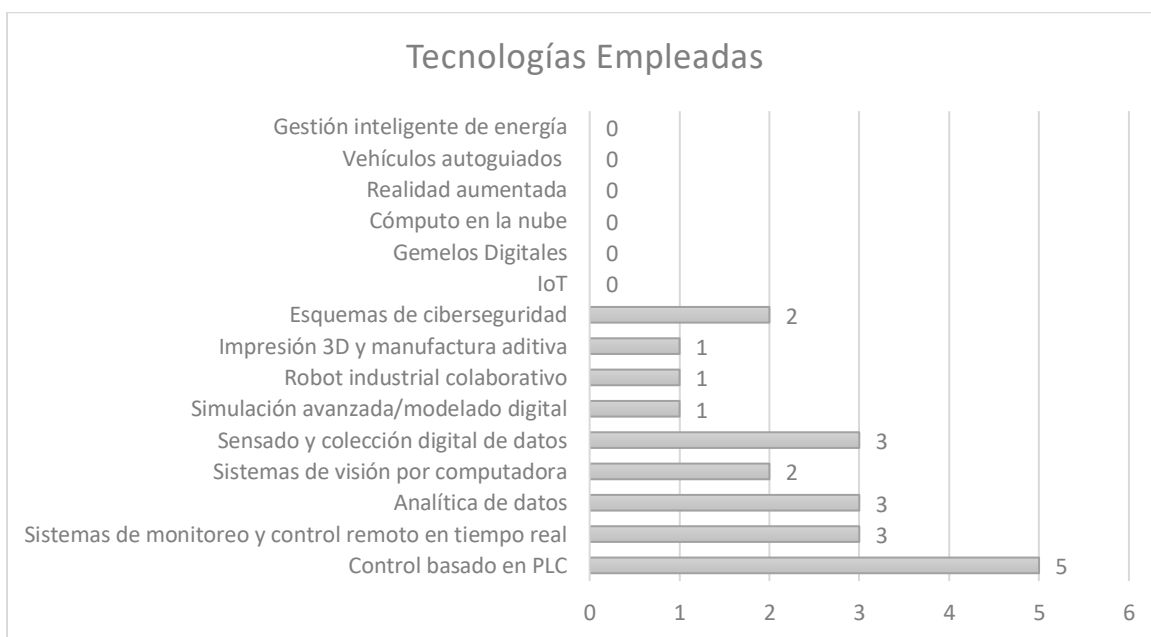
tienen una edad promedio de 43 años. Todos ellos cuentan con estudios profesionales concluidos en el área de ingeniería, siendo estos Ingeniero en Mecatrónica (n=1), Ingeniero Eléctrico (n=1), Ingeniero en Electrónica (n=1) e Ingeniero Mecánico Electricista (n=2).

Los participantes tienen en promedio cinco años de antigüedad en su puesto y todos tienen personal técnico a su cargo, entre ingenieros y técnicos. Se les cuestionó sobre cuál es el modelo de mantenimiento seguido por la empresa en la que laboran. Sus respuestas indican que se emplea el mantenimiento preventivo-programado (B, MM y E), mantenimiento productivo total (M) y mantenimiento basado en la confiabilidad (A).

A su vez, el sistema de gestión de mantenimiento que emplean para la planificación y seguimiento de tareas corresponde a: un desarrollo

informático propio (A, MM), sistema informático comercial (B, E) y a formatos y registros en papel (M). Los sistemas comerciales reportados fueron identificados como PMC2000 y SAP ERP software.

En cuanto a las tecnologías empleadas actualmente en la empresa, se les proporcionó un listado generado a partir de la revisión documental y se preguntó “¿cuáles emplea actualmente la empresa?”. La Figura 1 da muestra de las respuestas, siendo las más comunes el Control basado en PLC, seguido por el sensado y colección digital de datos, los sistemas de monitoreo y control remoto en tiempo real, y la analítica de datos. Por el contrario, los entrevistados indican que actualmente no se emplean en sus empresas el IoT, gemelos digitales, cómputo en la nube, realidad aumentada, vehículos autoguiados ni la gestión inteligente de energía.



**Figura 1.** Tecnologías empleadas por las empresas entrevistadas. El orden de presentación corresponde a la frecuencia de mención obtenida en las respuestas. Fuente: Elaboración propia a partir de las respuestas proporcionadas por los entrevistados.

En cuanto a la disponibilidad de personal calificado, se realizó la pregunta: *en los últimos*

*tres años, ¿ha tenido la necesidad de contratar nuevo personal técnico debido a la*



*incorporación de nuevas tecnologías en la empresa?* Dos entrevistados señalan que sí debieron contratar nuevo personal técnico debido a la incorporación de nuevas tecnologías en la empresa. A pesar de ello, quienes contrataron señalan que no tuvieron problemas para ubicar al personal que cubriera el perfil requerido.

Al preguntarles sobre cuáles fueron los conocimientos requeridos en las últimas contrataciones, en una de las empresas que sí contrataron no correspondía a conocimientos especializados sino a conocimientos base de la ingeniería en temas como la neumática, hidráulica, control, programación, etc. Por el contrario, la empresa de energía requirió realizar la contratación de personal con conocimiento especializado en una plataforma de turbina eólica.

En cuanto a los programas de capacitación del personal técnico, tres empresas reportan haber capacitado a su personal en los últimos tres años. Los temas en que se han formado han sido temas generales de ingeniería, en robótica y para la

transferencia de líneas de producción de otros países. Todas las capacitaciones fueron realizadas internamente por la empresa, excepto la capacitación en robótica para la cual la empresa contrató un servicio externo.

Se indagó también sobre las habilidades y conocimientos más valorados por los entrevistados en la contratación y promoción del personal de mantenimiento. Se le proporcionó a los entrevistados un listado, obtenido a partir de la revisión documental sobre tendencias laborales, y se les preguntó “*cuáles son los más valorados en la contratación y promoción de su personal técnico*”. Con una escala Likert de 4 puntos (1 = Nada importante, 2 = Poco Importante, 3 = Moderadamente importante, 4 = Muy importante) se presentan en la Tabla 1 los resultados promedio obtenidos. Se observa como aspectos generales como los conocimientos sobre mecánica y electrónica, junto a la lectura de sus diagramas y las habilidades de comunicación son los más valorados por los entrevistados en las funciones de mantenimiento.

**Tabla 1.** Valoración de las habilidades y conocimientos requeridos en el personal de Mantenimiento

Habilidades y Conocimientos	Valoración Promedio
Habilidades de comunicación oral y escrita	3.8
Pensamiento crítico	3.4
Inteligencia emocional y Resiliencia	3.4
Conocimiento técnico general en mecánica y electrónica	3.8
Solución de problemas	3.6
Idioma inglés	3.4
Lenguajes de programación	3.2
Liderazgo y trabajo en equipo	3.6
Lectura de diagramas mecánicos, eléctricos y neumáticos	3.8
Manejo de equipo de metalmecánica	3.4
Diseño mecánico en 3D	3
Instrumentación electrónica	3.6



Por lo que respecta a la pérdida de personal cualificado por rotación, cuatro de los cinco entrevistados mencionan haberla padecido y solamente uno de ellos responde que no la han experimentado. Las estrategias que se siguen en sus empresas para evitar la pérdida de talento humano por rotación incluyen la promoción, aumento de sueldo, bonos y capacitación interna tanto en aspectos técnicos como en valores corporativos.

De lo anterior se desprende que los entrevistados manifiestan una satisfacción moderada con relación a las capacidades técnicas del personal a su cargo y que esto no han sido un factor negativo hasta ahora. Sin embargo, entre los comentarios vertidos por los participantes se ha mencionado la necesidad de cambiar la mentalidad del personal para que desarrollen mayor iniciativa, responsabilidad, autoformación y mentalidad de mejora continua.

En términos generales, puede verse que las tecnologías empleadas por las empresas locales observadas en el estudio corresponden poco a las identificadas con la I4.0. Los esquemas de formación actuales han podido responder hasta el momento de manera general a los requerimientos del sector manufacturero local. Asimismo, la oferta de empleo en la región ha sido tal que la rotación se encuentra presente en la mayoría de las empresas, con un índice de rotación de personal directo del 7.6% en promedio [25]. De las empresas entrevistadas, 4 de 5 indican haber perdido personal por rotación en últimos tres años. Ante la pregunta “¿qué estrategias sigue la empresa para evitar esta pérdida de talento humano?”, se observa que las estrategias de retención de las empresas son tradicionales ya que se centran en la remuneración económica del trabajador con bonos, aumento de sueldo y promoción.

En cuanto al modelo de mantenimiento implementado, puede observarse que el preventivo es usado en la mayoría de las empresas. El mantenimiento predictivo, característico de la I4.0, no es empleado por ninguna de las empresas entrevistadas. Esto último se asocia al tipo de tecnologías empleadas y, como ha sido mencionado, a la alta inversión económica que involucra el establecimiento de este tipo de industria.

Los resultados apuntan además a la falta de colaboración entre el sector educativo y las necesidades de capacitación y actualización del área de mantenimiento de la industria de manufactura local. De igual forma, se revela una oportunidad para incrementar la colaboración ya que los esquemas de formación a los cuales recurren las empresas no establecen vinculaciones con las instituciones educativas. Por el contrario, las capacitaciones continúan siendo internas lo cual limita la innovación estratégica y el desarrollo de I4.0 al centrarse en prácticas puntuales. Las sinergias requeridas para el desarrollo de I4.0 continúan siendo un área de oportunidad para el sector manufacturero local.

#### 4. Conclusiones

El desarrollo de Industria 4.0 involucran diversas dimensiones adicionales a la tecnológica. El factor humano no ha sido considerado lo suficiente en las investigaciones sobre desarrollo de I4.0, ya que el foco se ha centrado en las posibilidades técnicas del trabajador sin considerar su experiencia global a profundidad, incluyendo el ambiente tecnológico, organizacional, procedimental y psicosocial [26]. Adicionalmente, otros aspectos relevantes van surgiendo gradualmente, con relación a la protección al medio ambiente y la seguridad en las operaciones [13], incluyendo la salud y seguridad ocupacional (occupational health and safety -OHS por sus siglas en inglés) [27].



Se prevé que la integración de nuevas tecnologías en las organizaciones generará problemáticas relacionadas con la insuficiente experiencia de los trabajadores y las curvas de aprendizaje, la selección y reclutamiento de nuevo personal, así como también con el aprendizaje de la fuerza laboral que envejece. Estas problemáticas impactarían particularmente al personal que se encuentra directamente a cargo de operaciones como el mantenimiento de equipo. Al momento se han generado pautas generales sobre las habilidades y conocimientos del personal en la I4.0, pero son necesarios más estudios interdisciplinarios sobre la optimización de la integración del trabajo humano con los equipos inteligentes [27].

En lo que respecta a la industria de manufactura local y las necesidades de formación del personal de mantenimiento, de acuerdo con lo observado éstas continúan centrándose en los conocimientos básicos de ingeniería. La tecnología de Industria 4.0 no ha alcanzado localmente una penetración que genere disrupciones en los métodos de trabajo o los esquemas de contratación y promoción. Aun así, existe una amplia área de oportunidad para el diagnóstico de necesidades y el impulso de estrategias en vinculación con el sector educativo, que permitan generar condiciones para la competitividad técnica del sector.

Por otra parte, entre las limitaciones del estudio se encuentra en primer término el alcance de los resultados, por lo que resulta aconsejable realizar un estudio descriptivo ampliando la muestra de empresas locales. En segundo término, los avances en los métodos y tecnologías que sustentan los programas de mantenimiento predictivo y que actualmente se encuentran en su etapa inicial, por lo que se prevé producirán cambios en las dinámicas de la organización. Derivado de lo anterior, se propone realizar trabajo futuro para ampliar los resultados y

construir una matriz de competencias asociadas a los esquemas de mantenimiento predictivo. A partir de dicho trabajo las instituciones educativas, particularmente las de educación superior, podrían abordar este segmento de usuarios potenciales para que cumplan con las funciones de reentrenamiento, capacitación y actualización del personal de la industria de manufactura. Adicionalmente, se plantea a la certificación de competencias técnicas, en conjunto con los sistemas nacionales de reconocimiento a credenciales, como una propuesta que aportara competitividad al sector.

## 5. Agradecimiento

Agradecemos a los responsables de mantenimiento de empresas locales quienes amablemente compartieron su tiempo y experiencia para la realización del presente trabajo.

## 6. Agradecimiento de autoría

*Patricia Avitia Carlos:* Conceptualización; Ideas; Metodología; Escritura del borrador original y Administración del Proyecto; *Alex Bernardo Pimentel Mendoza:* Metodología; Investigación; Escritura: revisión y edición; *José Luis Rodríguez Verduzco:* Investigación; Análisis formal; Escritura: revisión y edición; *Bernabé Rodríguez Tapia:* Investigación; Análisis formal; Escritura: revisión y edición.

## Referencias

- [1] M. Compare, P. Baraldi and E. Zio, "Challenges to IoT-enabled Predictive Maintenance for Industry 4.0," IEEE Internet of Things Journal, pp. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2957029>
- [2] Y. Lu, "Industry 4.0: A survey of technologies, applications and open research issues," Journal of Industrial Information Integration, pp. 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>





- [3] A. Benešová and J. Tupa, "Requirements for Education and Qualification of People in Industry 4.0," *Procedia Manufacturing*, p. 2195 - 2202, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.366>
- [4] E. Jantunen, P. Sharma, J. Campos and D. Baglee, "Digitalization of Maintenance," in 2nd International Conference on System Reliability and Safety, Chengdu, China, 2017. <https://doi.org/10.1109/ICSRS.2017.8272846>
- [5] P. Poor, J. Basl and D. Zenisek, "Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development," in International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), Sri Lanka, 2019. <https://doi.org/10.23919/SCSE.2019.8842659>
- [6] T. Zheng, M. Ardolino, A. Bacchetti and M. Perona, "The applications of Industry 4.0 technologies in manufacturing context: a systematic literature review," *International Journal of Production Research*, vol. 59, no. 6, pp. 1922-1954, 2021. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824085>
- [7] J. M. Müller, "Business model innovation in small- and medium-sized enterprises," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 30, no. 8, pp. 1127-1142, 2019. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2018-0008>
- [8] J. W. Veile and D. Kiel, "Lessons learned from Industry 4.0 implementation in the German manufacturing industry," *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 31, no. 5, pp. 977-997, 2020. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0270>
- [9] "A new dynamic predictive maintenance framework using deep learning for failure prognostics," *Reliability Engineering and System Safety*, no. 188, pp. 251-262, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.03.018>
- [10] "Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies," *International Journal of Production Economics*, no. 210, pp. 15-26, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- [11] S. Ayad, L. S. Terrissa and N. Zerhouni, "An IoT Approach for Smart Maintenance," in International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC\_ASET), Túnez, 2018. <https://doi.org/10.1109/ASET.2018.8379861>
- [12] D. Pal, J. Vain, S. Srinivasan and S. Ramaswamy, "Model-based maintenance scheduling in flexible modular automation systems," in 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2017. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247738>
- [13] D. TRAN ANH, K. DĄBROWSKI and K. SKRZYPEK, "The predictive maintenance concept in the maintenance department," *Foundations of Management*, vol. 10, 2010.
- [14] S. Gallego García and M. García García, "Industry 4.0 implications in production and maintenance management: An overview," in 8th Manufacturing Engineering Society International Conference, Madrid, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.027>
- [15] T. Zonta, C. A. da Costa, R. da Rosa Righi, M. J. de Lima, E. S. da Trindade and G. Pyng Li, "Predictive maintenance in the industry 4.0: A systematic literature review," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 150, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>
- [16] M. D. Nardo, M. Madonna, P. Addonizio and M. Gallab, "A mapping analysis of maintenance in Industry 4.0," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 19, pp. 653-675, 2021. <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2021.19.6.1460>
- [17] "Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review," *Computers in Industry*, no. 123, pp. 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>
- [18] G. Di Bona, V. Cesarotti, G. Arcese and T. Gallo, "Implementation of Industry 4.0 technology: new opportunities and challenges for maintenance strategy," in International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.258>
- [19] L. A. González Torres, M. A. Ibarra Cisneros and K. E. Cervantes Collado, "El impacto de las tecnologías de la información y comunicación en la industria manufacturera de Baja California," *Región y sociedad*, pp. 153-183, 2017. <https://doi.org/10.22198/rys.2017.69.a292>
- [20] J. Carrillo, R. Gomis, S. De los Santos, L. Covarrubias and M. Matus, "¿Podrán transitar los ingenieros a la Industria 4.0? Análisis industrial en Baja California," *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*,



vol. 22, no. 8, pp. 1-22, 2020.  
<https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2020.22.76089>

[21] IMPLAN, "Parques Industriales," Sociedad en Movimiento, no. XI, pp. 1-5, Julio-septiembre 2014.

[22] A. Reyes Mendoza, M. d. I. Á. Silva-Olvera and K. Ramírez Barón, "Liderazgo emprendedor y la innovación en empresas manufactureras de Tecate, B.C., México," VinculaTégica, pp. 267-273, 2018.

[23] Universidad Autónoma de Baja California, "Evaluación externa e interna del Programa Educativo Ingeniero en Mecatrónica," Mexicali, 2018.

[24] D. Horváth and R. Z. Szabó, "Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?" Technological Forecasting & Social Change, no. 146, pp. 119-132, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021>

[25] Monitor Económico, "Monitor Económico de Baja California," 2022. [Online]. Available: <https://monitoreconomico.org/noticias/2022/may/05/alta-rotacion-en-empresas-de-baja-california-arhitac/>. [Accessed 2022].

[26] "Industry 4.0 and the human factor - A systems framework and analysis methodology for successful development," International Journal of Production Economics, no. 233, pp. 1-16, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107992>

[27] S. M. Lee, D. Lee and Y. S. Kim, "The quality management ecosystem for predictive maintenance in the industry 4.0 era," International Journal of Quality Innovation, pp. 1-11, 2019.  
<https://doi.org/10.1186/s40887-019-0029-5>

[28] Z. M. Çınar, A. A. Nuhu, Q. Zeeshan, O. Korhan, M. Asmael and B. Safaei, "Machine Learning in Predictive Maintenance towards Sustainable Smart Manufacturing in Industry 4.0," Sustainability, pp. 1-42, 2020.  
<https://doi.org/10.3390/su12198211>

[29] A. Bousdekis, D. Apostolou and G. Mentzas, "Predictive Maintenance in the 4th Industrial Revolution: Benefits, Business Opportunities and Managerial Implications," IEEE Engineering Management Review, 2019. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2958037>

[30] A. Cachada, J. Barbosa, P. Leitão, C. A. S. Gerales, L. Deusdado, J. Costa, C. Teixeira, J. Teixeira, A. H. Moreira, P. M. Moreira and L. Romero, "Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture," in 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Torino, Italy, 2018.  
<https://doi.org/10.1109/ETFA.2018.8502489>

[31] J. Gebhardt, A. Grimm and L. M. Neugebauer, "Developments 4.0 Prospects on future requirements and impacts on work and vocational education," Journal of Technical Education (JOTED), pp. 117-133, 2015.  
<https://doi.org/10.48513/joted.v3i2.58>

Derechos de Autor © Patricia Avitia-Carlos, Alex Bernardo Pimentel-Mendoza, José Luis Rodríguez-Verduzco, Bernabé Rodríguez-Tapia



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](#)



# Evaluación del confort térmico y lumínico en aulas universitarias en Tijuana, Baja California. Caso de estudio FCITEC, Valle de las Palmas

## *Thermal and luminic comfort assessment in university classrooms in Tijuana, Baja California. Case of study FCITEC, Valle de las Palmas*

Maria Teresa de la Cruz Chaidez<sup>1</sup> , José Francisco Armendariz López<sup>1</sup> , Francisco José Martín del Campo Saray<sup>2</sup> , Miguel Isaac Sahagún Valenzuela<sup>1</sup> , María Cristina Castañón Bautista<sup>1</sup> , Carmen García Gómez<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Licenciatura de Arquitectura en Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez Unidad Académica de El Grullo, Jalisco, México

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Antropológicas de la Universidad Autónoma de Yucatán; Mérida, Yucatán, México

**Autor de correspondencia:** Maria Teresa de la Cruz Chaidez, 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. E-mail: arqteredelacruz@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4703-8626.

Recibido: 24 de Agosto del 2022

Aceptado: 21 de Diciembre del 2022

Publicado: 31 de Diciembre del 2022

**Resumen:** Con relación a 2022, los estudios sobre las condiciones ambientales al interior de las aulas se han incrementado debido a que se relacionan con el bienestar, el rendimiento y la productividad de los estudiantes en términos de concentración, atención y aprendizaje durante el horario escolar. Evaluar las condiciones del espacio educativo una vez habitado puede ser fundamental para identificar ajustes ambientales que puedan mejorar el rendimiento de los alumnos en los aprendizajes a través de estrategias de diseño en los equipamientos escolares de la localidad. Se presenta la evaluación de las condiciones térmicas y lumínicas de tres aulas diseñadas para funcionar con ventilación natural, en dos edificios de la Universidad Autónoma de Baja California, en Tijuana, México, durante el periodo de transición frío-cálido. Se realizaron mediciones físicas de los indicadores ambientales, incluyendo temperatura, humedad relativa y luz natural. Un total de 181 estudiantes completaron los cuestionarios de la encuesta sobre el ambiente interior. Este estudio tuvo como objetivo evaluar las condiciones ambientales del espacio y determinar la influencia en el confort de los ocupantes. Los resultados mostraron que más del 50% de los estudiantes se encontraban en una situación de incomodidad térmica cuando la temperatura estaba fuera del rango de 19.7°C - 27.7°C, consistente con la aplicación de las Zonas de Confort Adaptativo de ASHRAE. Los valores de luz natural de las tres aulas estuvieron por debajo del mínimo requerido de 300 Lux para aulas educativas [1, 2]. Los edificios con orientaciones Oeste y Sur registraron valores de iluminancia que podrían producir deslumbramiento y aumentar el malestar térmico debido a la alta radiación solar. Los resultados confirmaron la estrecha relación entre las condiciones ambientales y el confort de los estudiantes en las aulas.

**Palabras clave:** Confort ambiental; Confort térmico; Confort lumínico ventilación natural; Aulas universitarias.

**Abstract:** About 2022, studies on environmental conditions inside classrooms have increased because they are related to well-being, performance, and student productivity in terms of concentration, attention, and learning during school hours. Assessing the conditions of the educational space once inhabited can be fundamental to identifying environmental adjustments that could improve achievement in learning through design strategies in school facilities in the locality. The evaluation of the thermal and luminic conditions of three classrooms designed to function with natural ventilation, in two buildings of the Universidad Autónoma of Baja California, in Tijuana, Mexico, during the cold-warm transition period is presented. Physical measurements of environmental indicators were made, including temperature, relative humidity, and daylight. A total of 181 students completed the environmental survey questionnaires. This study aimed to evaluate the interior environmental space conditions and determine the influence on occupants' comfort. Results showed that more than 50% of the students were in a thermal discomfort situation when the temperature was out of range of 19.7°C -27.7° C, consistent with the application of the ASHRAE Adaptative Comfort Zones. Daylight values were below the minimum required of 300 Lux for educational classrooms specificity in [1, 2] of the three classrooms. Building's orientations, West and South registered illuminance values that could produce glare and increase thermal discomfort due to high solar radiation. The results confirmed the close relationship between environmental conditions and students' comfort in classrooms.

**Keywords:** Environmental comfort; Thermal comfort; Luminic comfort; Natural ventilation; University classrooms.



## 1. Introducción

La calidad ambiental en espacios educativos ha cobrado importancia debido a que se ha relacionado con el desempeño, bienestar y aprendizaje de los alumnos [3]. En estudios previos, los investigadores encontraron que la incomodidad de los ocupantes no está determinada por un solo factor ambiental, sino por varios factores que influyen de forma integral en los aspectos psicológicas y fisiológicos de las personas. Principalmente el térmico, lumínico, acústico y calidad del aire [4, 5] considerados por tener mayor impacto en la salud, bienestar, desempeño y logro académico de los alumnos [6]; y en el aspecto del rendimiento energético del edificio [7].

El ser humano se encuentra expuesto a los cambios de las variables del clima, por lo que busca mantener el interior de los espacios con el acondicionamiento ambiental adecuado para desarrollar sus actividades cotidianas de manera óptima.

El principal objetivo del diseño de edificios educativos es proporcionar espacios acondicionados que promuevan las actividades de aprendizaje de manera óptima [8]. De acuerdo con los resultados Panorama de la Educación 2017 de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), México se ubica en los últimos lugares con los resultados de aprovechamiento más bajo de los países pertenecientes a la organización. Los problemas en la infraestructura educativa ha sido una constante sobre todo en los países en desarrollo. En el diagnóstico de las escuelas presentado por la Secretaría de Educación Pública, establece que los universitarios no cuentan con servicios educativos de calidad para el desarrollo de sus actividades educativas [1, 8].

Evaluar las condiciones ambientales de los espacios educativos permite establecer las estrategias de diseño de futuras construcciones y, en el caso de las ya edificadas llevar a cabo las adecuaciones que permitan a los estudiantes realizar sus actividades de aprendizaje de manera apropiada [9].

El estudio del ambiente interior se ha realizado evaluando diferentes factores como Vilcekova et al. [5] que incluyeron en su estudio el ambiente térmico, acústico, lumínico, calidad del aire y CO<sub>2</sub>. Encontraron que las condiciones ambientales no satisfacían el confort de los alumnos, además, encontraron muy alta concentración de PM<sub>10</sub> y CO<sub>2</sub>; También, Peter Barret et al. [8] evaluó la luz natural, temperatura del aire, sonido y calidad del aire, demostrando que estos parámetros ambientales tenían un impacto en el aprendizaje de 50%; y Krüger y Zannin [6] consideraron el confort acústico, térmico y lumínico, donde los resultados mostraron la fuerte interdependencia entre los factores ambientales.

Esta investigación fue realizada durante y al término la contingencia sanitaria del COVID-19, donde fueron cerradas las escuelas. La Universidad Autónoma de Baja California (UABC) otorgó permiso a los autores para realizar la investigación dentro del campus Valle de las Palmas. La elección de las aulas se basó en la diferencia que presentaban en cuanto a la utilización de los materiales de construcción y a la orientación de la envolvente del edificio. Estas diferentes características físicas se encontraron en aulas de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (FCITEC).

El estudio de campo inició en marzo del 2021 al mismo tiempo que se estableció la contingencia sanitaria. Por lo que la metodología se diseñó para realizar las mediciones de las variables



higrotérmicas interior y exterior en aulas desocupadas durante un año, encuestar a los alumnos en abril 2022, una vez que regresaron a la escuela y comparar los resultados con la normatividad ISO7730.

En este marco, se presenta esta investigación que tiene como objetivo evaluar las condiciones térmicas y lumínicas de tres aulas ventiladas naturalmente, localizadas en dos edificios del FCITEC durante el periodo de transición frío-

## 2. Revisión de la literatura

### 2.1 Confort térmico

El confort térmico es uno de los factores ambientales ampliamente estudiado por diferentes autores del mundo. Para evaluar el confort térmico de los ocupantes se ha utilizado el modelo racional utilizado en espacios interiores: el modelo racional de Fanger [10] utilizado en cámaras climáticas, considerando usuarios pasivos [11] y modelo adaptativo aplicados en espacios con ventilación natural, donde los ocupantes interactúan con el entorno, desarrollando una adaptación y preferencias térmicas [12].

Las edificaciones educativas, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, Baja California, México, están diseñadas tomando en cuenta los estándares internacionales ASHRAE55:2004, EN 1525 aplicadas en aulas naturalmente ventiladas. La carta psicométrica de zonas de confort establece para Valle de las Palmas un rango de temperatura entre 19.7°C y 27.7°C y una Humedad Relativa del 50%

En México, la construcción de escuelas está regido por el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa (INIFED) bajo las Normas y Especificaciones para Estudios

cálido que permita entender la percepción ambiental subjetiva de los alumnos dentro del aula.

Los resultados de este estudio podrían utilizarse para establecer nuevas estrategias en el diseño de espacios educativos y en la identificación de ajustes o mejoras que se requieren en zonas climáticas como las de Tijuana, específicamente de Valle de las Palmas.

Proyectos Construcción e Instalaciones [13]. La cual recomienda para aulas una temperatura del aire de 18°C a 25°C, cuando la humedad relativa es 50% y la velocidad del aire de 0 a 0.2 m/s aire.

De acuerdo con la revisión de la literatura, se presenta en la Tabla 1 del Estado del Arte del confort térmico, los estudios previos que han evaluado el confort térmico interior en edificios educativos que sirvieron para realizar este estudio.

Anguita et al. [14] presentaron un estudio en dos aulas de Granada, bajo la norma ISO 7730, para comparar los valores obtenidos de las mediciones de campo y las respuestas de la encuesta de satisfacción térmica realizada a los alumnos. Los resultados mostraron que el porcentaje de incomodidad de los ocupantes se duplicó respecto al cálculo del PMV y PPD de acuerdo con la ISO 7730.

El-Darwish y El-Gendy [15] investigaron las condiciones ambientales térmicas de tres aulas en Behera, resultando que el 66% los estudiantes se encontraban térmicamente cómodos dentro de las aulas. No obstante, después de aplicar la encuesta, se encontró que solo la tercera parte de los ocupantes estaban satisfechos con las condiciones térmicas del espacio interior.





Fabozzi y Dama [16] realizaron una investigación en Milán, en aulas naturalmente ventiladas y con aire acondicionado, en la cual determinaron que un número considerable de estudiantes no aceptaban las temperaturas de confort adaptativas recomendadas por EN 15251.

Por otro lado, Jindal [17] descubrió que los estudiantes en Ambala tenían mayor tolerancia al calor, sintiéndose en una situación confortable estando fuera del rango de temperatura de confort establecido en las normas.

Los experimentos realizados permitieron conocer las condiciones térmicas ambientales de los espacios y el impacto en el confort de los estudiantes durante un periodo estacional. La adaptación de los usuarios a las condiciones térmicas en aulas naturalmente ventiladas fue diferente en cada localidad. Si bien, los datos no son suficientes para que sean utilizados como normatividad para el diseño de espacios educativos localmente, pueden servir como principio rector para el futuro de los estándares de cada zona como lo menciona Mishra y Ramgopal [18] en su estudio.

El confort térmico de los alumnos en aulas naturalmente ventilados ha sido evaluado a través del acercamiento objetivo (mediciones de campo) y subjetivo (entrevistas de satisfacción) permitiendo conocer la sensación, preferencia y aceptabilidad térmica de los ocupantes.

Corgnati et al. [19] investigaron el confort térmico en dos aulas universitarias ventiladas naturalmente en Turín, durante el periodo cálido. Aplicaron cuestionarios de confort térmico midiendo simultáneamente de los parámetros térmicos. Los resultados mostraron una tendencia de preferencia térmica ligeramente más cálido en invierno y neutra en temporada templada.

En la investigación de Nico et al. [20] los alumnos mostraron preferencia térmica por un ambiente más cálido. También, encontraron una ligera diferencia entre las respuestas de hombres y mujeres y una influencia del diseño espacial en las condiciones térmicas del aula.

Yao et al. [21] encontraron que, en China, los estudiantes preferían la temperatura más altas que la temperatura térmica neutra. Esto indicó que la preferencia por un ambiente térmico más cálido en condiciones climáticas cálidas y frías, mostrando alta tolerancia a las condiciones más cálidas.

Subhashini y Thirumaran [22] identificaron áreas con una diferencia de 4-5°C más alta que la temperatura neutra; la situación fue similar para Hwang et al. [23] donde propusieron rangos específicos para determinadas escalas del confort térmico. Liu et al. [24] estimó nuevos rangos de temperatura térmica, neutra y la de preferencia de los ocupantes.

Es fundamental resaltar que, además de las variables térmicas ambientales, los autores han considerado factores del diseño arquitectónico [14] que influyen en la percepción térmica de los estudiantes, como la orientación, el sistema constructivo y la geometría del espacio [20].

Obtener resultados de confort térmico diferentes a los estándares internacionales, se ha convertido en una preocupación común entre los investigadores que esperan poder verificarlos en contextos locales, por lo que han recomendado realizar un mayor número de estudios locales [25].

La comprobación de valores predeterminados por los estándares internacionales y locales en una zona determinada, por medio de acercamientos objetivos y subjetivos, revelan datos reales que pueden ser utilizados para



mejorar las condiciones de confort de los alumnos para que realicen sus las actividades de aprendizaje de manera óptima.

**Tabla 1.** Estado del arte confort térmico

Referencia	Autor (año)	Ciudad/ País	Clima	Aulas /espacios	Parámetros medidos					Número encuestas
					T <sub>a</sub>	T <sub>mr</sub>	HR	V <sub>aire</sub>	Clima	
[11]	Aghniaey (2019)	Georgia, Estados Unidos	Húmedo subtropical	1	√	√	√	√	√	1336
[14]	Anguita (2018)	Granada, España	Mediterráneo y semiárido	2	√	√	√	√	√	119
[15]	El Darwish (2018).	Behera, Egipto	Árido caliente	3	√	√	√	√	*	N/A
[16]	Fabozzi (2020)	Milán Italia	Templado	16	√	√	√	√	√	985
[17]	Jindal (2018).	Ambala, India	Frio	*	√	√	√	√	√	40
[18]	Mishra (2015)	Kharagpur, India	Tropical	1	√	√	√	√	*	67
[19]	Corgnati (2009).	Turín, Italia	Continental y cálido	2	√	√	√	√	*	230
[20]	Nico (2015)	Bari, Italia	Mediterráneo	2	√	√	√	√	√	126
[21]	Yao (2010)	Chongqing, China		5 edificios	√	√	√	√	*	3000
[22]	Subhashini (2018).	Madurai, India	Cálido y frío	2	√	*	*	*	√	180
[23]	Hwang (2006)	Taiwán	Caliente y húmedo	4	√	√	√	√	√	40
[24]	Liu (2019)	Xi'an, China	Selva tropical	7	√	√	√	√	*	992
[25]	Buratti (2017)	Perugia, Italia	*	1	√	√	*	*	*	n/a
[27]	Zaki (2017)	Kuala Lumpur, Malaysia, Chikushi and Japón	Monzón	24	√	√	√	√	*	1428
[28]	Rincón (2017)	Ensenada, México	Semiárida y húmedo subtropical	2	√	√	√	√	√	126
[29]	Kong (2019)	Chongqing, China	Mediterráneo	Cámara controlada	√	√	√	√	√	24
[30]	Draganova (2019)	Toyohashi, Japón	Cámara controlada	Dormitorios	√	√	√	√	√	324

\*No especificado.

Abreviaturas: Temperatura del aire (T<sub>a</sub>), Temperatura media radiante (T<sub>mr</sub>); Humedad Relativa (HR); Velocidad del aire (V<sub>aire</sub>)

Fuente: Elaboración propia.



## 2.2. Confort lumínico

El confort lumínico es el factor ambiental que permite conocer los niveles de luz natural para que el ser humano pueda realizar sus actividades cotidianas dentro de un espacio [26]. La luz natural es necesaria para que nuestro cuerpo funcione y realice correctamente las actividades físicas y mentales durante el día, ya que el ojo humano se siente más cómodo con luz natural [27]. En el caso de los edificios educativos, el diseño de la envolvente del edificio debe contemplar el aprovechamiento de la luz natural para garantizar la calidad del confort lumínico como necesidad imprescindible de los alumnos para el desarrollo de sus tareas de aprendizaje, la preservación de la salud, el bienestar, buen humor y la seguridad dentro del ambiente interior del aula [28].

Para establecer los requisitos de iluminancia interior en los centros de trabajo, la Secretaría del Trabajo y Previsión Social en la norma NOM-25-STEPES 2008 [1] y Normas y Especificaciones para Estudios Proyectos Construcción e Instalaciones [13] especifican las cantidades mínimas de Lux requeridas para cada actividad visual.

En el caso de las aulas educativas, se establece un mínimo de 300 Lux para que las actividades de enseñanza-aprendizaje se puedan realizar en un ambiente seguro y saludable [1]. Estos requisitos mínimos de iluminancia siguen la Norma UNE 12464.1 que pretende cubrir tres necesidades humanas básicas: el confort visual, el rendimiento visual y la seguridad (UNE 12464.1 2022).

Para el diseño y construcción de edificios educativos, el INIFED recomienda una orientación Norte-Sur [13], donde debe considerarse la geometría de las aulas y las aberturas de ventanas y puertas para la

penetración de luz natural. En México, los estudios sobre el confort lumínico son escasos aun cuando existe un gran potencial en el uso de la luz natural en los espacios educativos para mejorar los logros de aprendizaje de los alumnos. El confort lumínico del presente estudio tiene algunas similitudes con los estudios registrados en la Tabla 2 del Estado del Arte confort lumínico.

Corvalán [29] analizaron el nivel de iluminancia y de confort en aulas universitarias para verificar si los valores obtenidos cumplían con la normativa gubernamental. Los resultados mostraron que los puntos centrales de la cuadrícula de medición que coincidían con la luminaria, cumplían con los requerimientos, pero otros puntos apenas registraron el mínimo necesario.

Freewan [30] encontraron problemas de uniformidad y bajos niveles de iluminación natural, así como la dependencia de la luz artificial. El estudio se basó en simulación y mediciones de campo de iluminación y uniformidad. La simulación determinó que al potenciar algunos elementos de diseño podría mejorar 100% el nivel de luz natural en la parte posterior del aula y controlar el deslumbramiento.

Los problemas de sobrecalentamiento y deslumbramiento interior se han relacionado con la orientación de la envolvente del edificio. Esto cobra mayor importancia cuando se trata de espacios educativos donde los estudiantes mantienen una posición permanente durante la clase, lo que pudiera causar que pierda la concentración y resulten alteraciones visuales.

El estudio realizado por Galal [31] en aulas de la costa libanesa, mostro que las orientaciones noreste y noroeste podrían ser más adecuadas para obtener niveles adecuados de luz natural y



para la ganancia de calor, en lugar de la orientación sur determinada para las escuelas en la norma gubernamental.

En edificio educativos de Valle de las Palmas, se ha observado que la luz natural penetra con distinta intensidad según la trayectoria del sol y el tamaño de las ventanas. El tratamiento en ventanas interior, orientadas al Sureste, no ha sido suficiente para evitar la penetración de la luz solar directa. En un caso de estudio similar Secchi et al. [32] encontraron que las ventanas orientadas al Este causaban problemas de sobrecalentamiento y deslumbramiento. Propusieron el uso de persianas horizontales o verticales externas para uniformizar la cantidad de luz diurna y con ello reducir el uso de luz artificial.

Michael y Heracleous [33] indicaron que los niveles de iluminación natural eran suficientes en las aulas en todas las orientaciones y que la uniformidad de la luz diurna era aceptable. Sin embargo, en aulas orientadas al este y al oeste había deslumbramiento. Observaron que las lámparas permanecieron encendidas durante el

horario laboral, manteniendo las cortinas cerradas para controlar el deslumbramiento. Para mejorar el confort visual propusieron persianas verticales en fachadas orientadas al Este y al Oeste.

Ricciardi y Buratti [34] realizaron encuestas a los estudiantes sobre las condiciones ambientales dentro del aula. Incluyeron el confort térmico, acústico y lumínico, encontrando que el factor visual tenía más del 30% de importancia respecto a los otros factores ambientales. Korsavi et al. [35] evaluaron la percepción de confort visual de los estudiantes mediante la realización de una simulación. Los resultados mostraron que las métricas dinámicas no garantizaban el confort visual y que los valores más bajos y altos, no necesariamente causaban molestias visuales. Se encontró una fuerte correlación entre los valores medios de iluminancia y la percepción del confort visual.



**Tabla 2.** Estado del Arte confort lumínico

Referencia	Autor (año)	Ciudad/Países	Número aulas	Parámetros medidos				Consumo energético	Número encuestas
				I	U	D/R	Ta, HR, V <sub>aire</sub>		
[29]	Corvalán (2015)	*	2	√		√	√	*	*
[30]	Freewan (2020)	Jordania	1	√	√	*	*	*	*
[31]	Galal (2019)	Trípoli, Líbano	*	√	√	√	√	*	*
[32]	Secchi (2015)	Chianti, Italia	2	√	√	*	√	*	*
[33]	Michael (2017)	Nicosia, Chipre	4	√	*	√	*	*	40
[34]	Ricciardi (2018)	Pavia, Italia	7	√	*	*	*	*	928
[35]	Korsavi (2015)	Kashan, Irán	2	√	√	*	√	*	126
[36]	Kritikou (2018)	Estocolmo, Suecia	6	√	*	*	√	√	242
[37]	Ferrara (2018)	Turín, Italia y Palermo, Sicilia	1	√	*	*	*	√	*
[38]	Zomorodian (2019)	Texas, E. U.	2	√	*	√	*	*	27

\*No especificado

Abreviaturas: Iluminancia (I), Uniformidad (U); Deslumbramiento/Reflectancia (D/R);, Temperatura del aire (Ta), Humedad relativa (HR), Velocidad del aire (V<sub>aire</sub>)

Fuente: Elaboración propia.

Los investigadores han evaluado las condiciones lumínicas en espacios educativos en conjunto con otros factores ambientales como son el acústico, visual, el consume energético [36], confort térmico y visual [37]; el impacto del diseño arquitectónico en la percepción de los estudiantes, considerando la orientación y las diferencias entre los espacios físicos [38].

La revisión de la literatura mostró un número limitado de estudios realizados en México sobre confort térmico y lumínico. Al 2022, ninguno de ellos fue llevado a cabo en la localidad de Tijuana.

Tomando en cuenta que la respuesta que tienen las personas sobre las condiciones ambientales en espacios interiores varía dependiendo del clima, el diseño del espacio y la adaptación del

usuario, esta investigación tiene como objetivo evaluar las condiciones térmicas y lumínicas de tres aulas ventiladas naturalmente, que permita entender la percepción ambiental subjetiva de los alumnos dentro del aula durante el periodo de transición frío-cálido.

### 3. Caso de estudio

La Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Campus Valle de las Palmas se encuentra localizada en la parte Este en la periferia de la ciudad (32° 26' 07" N, 116° 40' 31" W) dentro de una parcela de aproximadamente 502,200 m<sup>2</sup>. En la Fig. 1 se puede ubicar en la parte Sur, del campus UABC los edificios E y F de la Facultad de ciencias de la Ingeniería y Tecnología (FCITEC) donde se realizó esta investigación.





**Figure 1.** Ubicación de los edificios E y F del FCITEC de la UABC Valle de las Palmas.

### 3.1. Condiciones climáticas

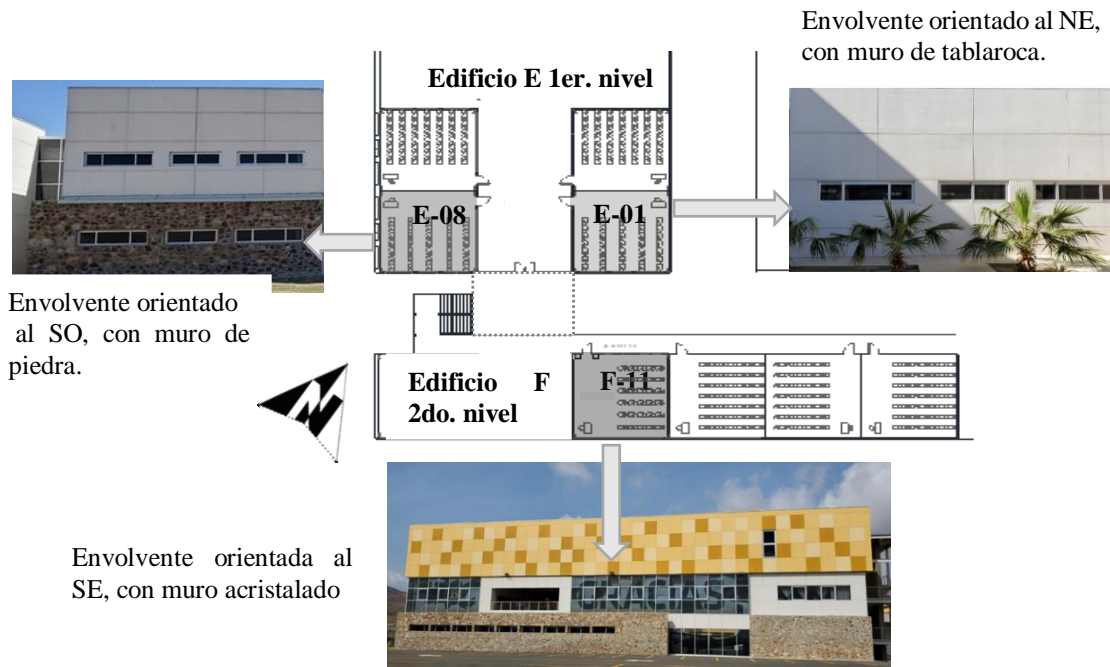
El clima de Tijuana es predominantemente árido, templado y seco (BSk según la Clasificación climática de Köppen, modificado por García, Enriqueta, 1998). Este clima también llamado Mediterráneo, tiene veranos calurosos e inviernos con días lluviosos. Presenta una temperatura media anual de 21.5 °C. En verano, la media sube a 26°C; durante el invierno, las temperaturas medias mínimas rondan los 6° C, y la precipitación media anual es de 230 mm [39].

### 3.2. Sistema constructivo e instalaciones

El diseño de los edificios se resolvió de la siguiente manera: el edificio E con orientación Noreste-Suroeste, en dos niveles, con aulas a ambos lados de un vestíbulo central. El edificio

F fue orientado al Sureste, en tres niveles en una sola línea de aulas a lo largo de un pasillo interior. EL sistema constructivo fue a base de estructura de acero, concreto, losa de acero, muros de tablaroca principalmente.

Los edificios están ventilados naturalmente, no cuentan con sistema de aire acondicionado ni calefacción. En cada aula tienen un ventilador mecánico empotrado en la pared o plafón. Durante los meses más cálidos, la ventilación es de forma natural, la cual es controlada por los ocupantes, abriendo y cerrando puertas y ventanas. Las aulas seleccionadas, indicadas en la Fig. 2, están denominadas como E-01 y E-08 del edificios E ubicadas planta baja y el aula F-11 del edificio F, en el segundo nivel.

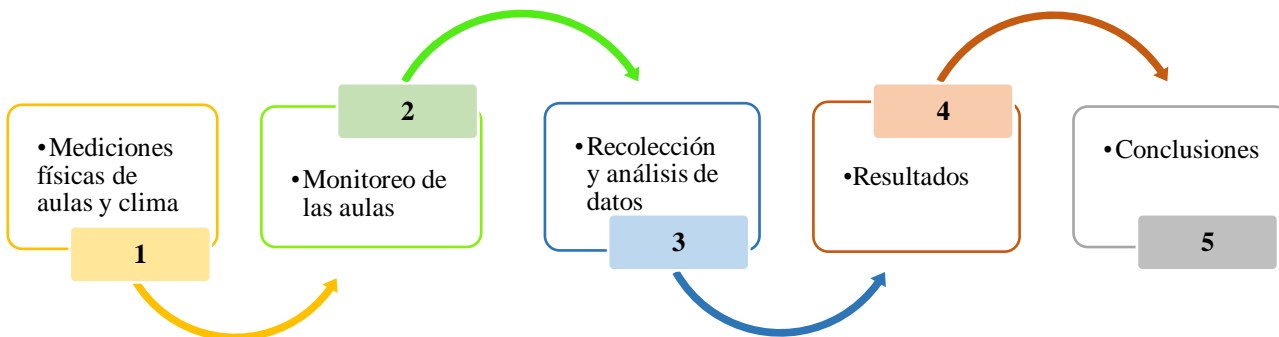


**Figura 2.** Característica de la envoltura de los edificios E y F del FCITEC y croquis de ubicación de las aulas seleccionadas E-01, E-08 y F-11 (elaboración propia, fotografías tomadas con cámara personal).

#### 4. Metodología

Para cumplir con el objetivo señalado anteriormente se determinó la metodología

mostrada en la figura 3 en cinco apartados que se mencionan a continuación.

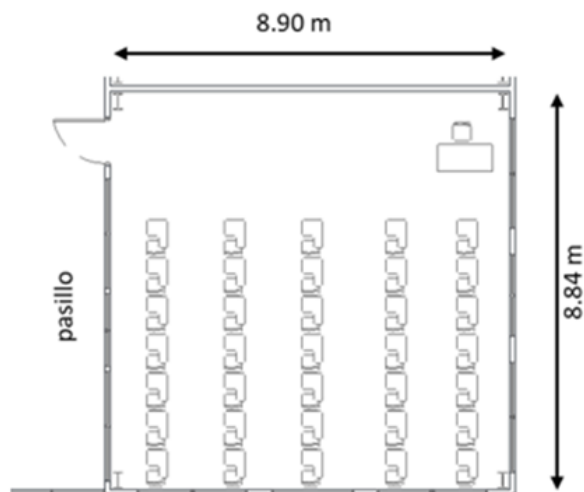


**Figura 3.** Proceso metodológico aplicado en esta investigación (elaboración propia).

##### 4.1. Mediciones físicas de las aulas y clima

El aula prototipo, como se muestra en el croquis de la Fig. 4, tiene un área de 78 m<sup>2</sup> (8.82 x 8.90 m). Tiene una puerta y aperturas para ventanas

para dotarla con luz y ventilación natural. Presenta la típica distribución de mesabancos en filas frente al pizarrón para una capacidad de 30 a 35 estudiantes.



**Figura 4.** Planta prototipo de las aulas del FCITEC en los edificios E y F (elaboración propia).

En la tabla 3, se presentan los instrumentos de medición utilizados para los parámetros ambientales térmicos y lumínicos para esta investigación.

La temperatura del aire ( $T_a$ ) y humedad relativa interior (HR) se midieron utilizando el registrador de datos ONSET Hobo U12-013 con rango de medición de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  ( $-4^{\circ}$  a  $158^{\circ}\text{F}$ ), precisión de  $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$  de  $0^{\circ}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0.63^{\circ}\text{F}$  de  $32^{\circ}$  a  $122^{\circ}\text{F}$ ). Para la humedad relativa el rango de medición es de 5% a 95% HR.

Para medir el estrés térmico se utilizó el instrumento WBGT Modelo HT30, marca EXTECH con un rango de temperatura de globo y bulbo húmedo (TGBH) de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$  a  $122^{\circ}\text{F}$ ); Temperatura de globo negro (TG)  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $550^{\circ}\text{C}$  ( $-22^{\circ}\text{F}$  a  $1022^{\circ}\text{F}$ ); Temperatura del aire ( $T_a$ )  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$  a  $122^{\circ}\text{F}$ ); Humedad Relativa (HR) de 0 a 100%HR, precisión HR  $\pm 3\%$  (@ $25^{\circ}\text{C}$ , 10 a 95%RH) resolución  $0.1^{\circ}\text{F}/^{\circ}\text{C}$ ;  $0.1\%$ HR Temperatura de operación  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  ( $32^{\circ}\text{F}$  a  $122^{\circ}\text{F}$ ) Humedad de operación Max. 80% HR. Para la velocidad del aire, se usó el anemómetro digital marca

Professional Instruments con un rango de 0-30 m/s, con un porcentaje de precisión de  $\pm 5$ .

El valor de la tasa metabólica se obtuvo de la Tabla 5.2.1.2. de valores metabólicos para actividades típicas del standard ANSI/ASHRAE55 [16], para actividad pasiva. Los valores de aislamiento de la ropa se obtuvieron con base en las respuestas del cuestionario y de acuerdo con la Tabla 5.2.2.2B de aislamiento de vestimenta ( $I_{clu}$ ) [16].

Los datos de temperatura y humedad relativa exterior fueron obtenidos de la estación meteorológica del FCITEC, localizada dentro del campus y del Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES) programa estadounidense del National Weather Service "NWS" de la NOAA por medio de la página de internet Meteored.





Para la medición de luz natural se utilizó el luxómetro medidor de luz digital Modelo GM1020, marca BENETECH con rangos de medición a escala completa: de 0~200,000 Lux con resolución 0.1, 1, 10 y 100 respectivamente, como se especifica en la Tabla 12, con precisión LED blanco de  $\pm 3\%$  de lectura + 2 Lux hasta 500



lux y  $\pm$  (3% lectura) > 500 Lux. Lecturas de ft-cd con precisión de  $\pm$  (3% lectura + 3 Fc) hasta 46 Fc  $\pm$  (3% lectura) > 46 Fc. Opciones de muestreo entre 1 segundo y 1 hora. El instrumento de

medida y su distribución cumplen con la NOM-025-STPS-2008 [1].

**Tabla 3.** Instrumentos de medición utilizados en esta investigación (elaboración propia).

Instrumentos de medición	Índice	Unidad	Rango de medición	Presición medición /rango medición
 <b>Registrador de datos HOBO U12-013, marca ONSET</b>	Temperatura del aire (TA)	°C	-20°C a 70°C	$\pm 0.35^\circ\text{C}$ de 0° a 50°C (32°F a 122°F)
	Humedad relativa (HR)	%	5% a 95% HR	
 <b>Medidor de estrés térmico WBGT Modelo HT30, marca EXTECH</b>	Temperatura de globo y bulbo húmedo (TGBH), humedad relativa (HR)	°C	0°C a 50°C (32°F a 122°F)	Calculado de parámetros medidos
	Temperatura de globo negro (TG),	°C	-30°C a 550°C (-22°F a 1022°F),	$\pm 2^\circ\text{C}$
	Temperatura del aire (TA)	°C	0° a 50°C (32°F a 122°F)	$\pm 1^\circ\text{C}$ (1.8°F)
 <b>Anemómetro digital</b>	Humedad relativa (HR)	%HR	0 a 100%	$\pm 3\%$ @ 25°C, 10 a 95% HR
	velocidad del aire (Vaire)	m/s	0-30	$\pm 5^\circ\%$
 <b>Medidor digital de iluminancia Marca BENETECH, Modelo GM1020</b>	Temperatura del aire (TA)	°C	-10°C a 45°C (14°F a 113°F),	$\pm 2^\circ\text{C}$
	Luz natural	Lux	0 ~2000,000 Lux	$\pm$ (3% lectura + 2 Lux) hasta 500 Lux $\pm$ (3% lectura) > 500 Lux

Para la encuesta se diseñó un cuestionario a propósito partiendo de preguntas subjetivas, utilizando la escala de siete puntos de ASHRAE, para entender la percepción de los alumnos respecto al ambiente térmico y lumínico de las aulas.

El cuestionario fue desarrollado en seis secciones: introducción; información personal (género, peso, estatura y edad); datos generales (tipo de ropa, tipo de ventilación y zona donde se sienta habitualmente). Las siguientes dos secciones fueron sobre sensación, percepción, preferencia y tolerancia térmica y lumínica. Además, en el último apartado se incluyó una

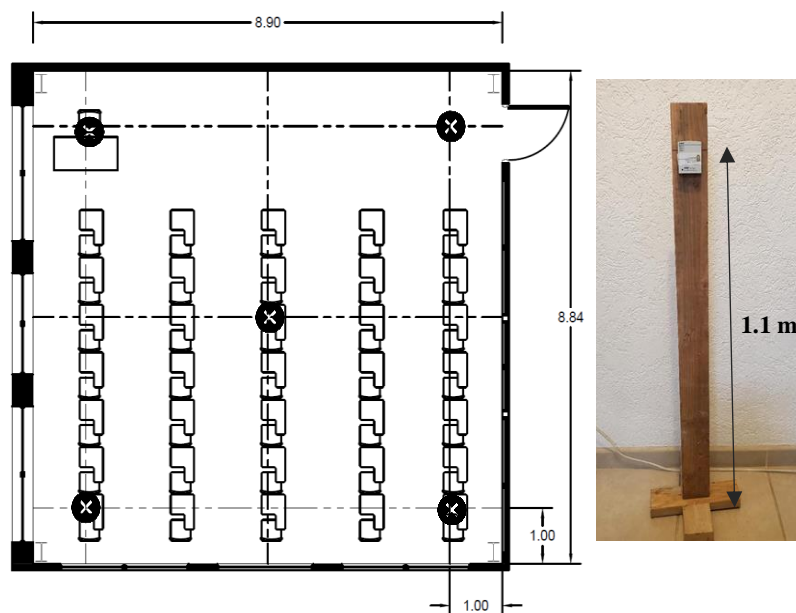


pregunta de opinión ¿Cuáles factores ambientales son los que más afectan en el desarrollo de sus actividades en el aula?

#### 4.2 Monitoreo de las aulas

La aplicación de las herramientas de medición se llevó a cabo en las aulas seleccionadas denominadas E-01, E-08 ubicadas en el primer nivel del edificio E y el aula F-11 en segundo nivel del edificio F, destinadas para clases teóricas. Cuentan con una superficie aproximada de 80 m<sup>2</sup> con capacidad hasta 35 estudiantes por aula.

La selección y ubicación de los instrumentos dentro del aula fue con base en ISO 7726 [36] y ANSI/ASHRAE 55 [37]. En el croquis de la figura 5 se indica la ubicación de los puntos de medición: dos al frente, dos en la parte posterior del aula y uno al centro. Los instrumentos fueron colocados en cinco puntos del aula en soportes de madera a una altura de 1.1 m del piso, correspondiente a la altura de la cabeza de una persona que se encuentra en posición sentada y a un metro de distancia de los muros. Los datos se registraron cada 10 minutos de acuerdo con la ISO 7726.



⊗ Registrador de datos Hobo

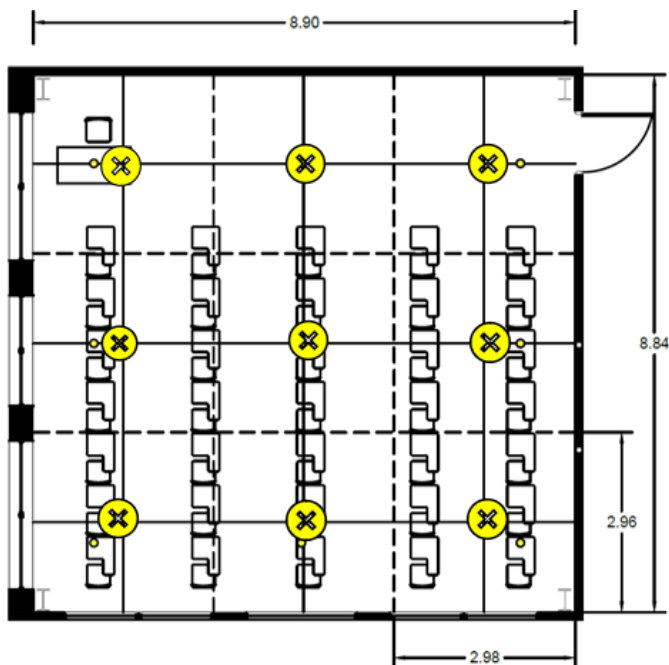
**Figura 5.** Croquis de ubicación de los puntos de medición de indicadores higrotérmicos: temperatura del aire y la humedad relativa interior (elaboración propia).

La determinación de los puntos de medición de la luz natural fue resolviendo la Ecuación 1 para el índice de área (IC) de la NOM-025-STPS-2008 [38], donde se obtuvo una retícula de nueve puntos, presentada en el croquis de la figura 6, para realizar las mediciones de luz natural dentro de las aulas.

$$IC = \frac{(x)(y)}{h(x)(y)} \quad (1)$$

Donde,  
x, y dimensiones del área (ancho y largo) y h = altura





⊗ Puntos de medición de luz natural

**Figura 6.** Croquis con retícula (2.96 x 2.94 m) de ubicación de los nueve puntos de medición para luz natural (elaboración propia).

#### 4.2.1. Cálculo del PMV y PPD

La sensación térmica del ser humano se vincula principalmente al balance térmico del cuerpo que depende de las temperaturas del aire y radiante, humedad relativa, velocidad del aire, el tipo de actividad física y el aislamiento térmico del arropamiento [39]. Con la obtención de estos datos, se puede calcular el Voto Medio Estimado (PMV) que determina el valor medio de los votos sobre una escala de sensación térmica de 7 puntos, indicada en la tabla 4. El balance térmico la ganancia o pérdida de calor provocada por el

metabolismo y el proceso fisiológico de termorregulación que reacciona ante los elementos externos del clima y el intercambio de calor que se produce entre la persona y el espacio donde realiza su actividad [40]. Los valores térmicos recomendados por la norma ISO 7730:2006 deben proporcionar bienestar térmico al 90% de los ocupantes. Por lo que se considera como personas insatisfechas aquellas que votaron la sensación térmica: mucho calor, calor, frío, mucho frío.



**Tabla 4.** Escala se sensación térmica

Sensación Térmica	Escala
Mucho calor	+ 3
Calor	+ 2
Algo de calor	+ 1
Ni frío ni calor	0
Algo frío	-1
Frío	-2
Mucho frío	-3

Fuente: ISO 7730.

El Porcentaje Estimado Insatisfechos (PPD), es una predicción cuantitativa del porcentaje de personas no satisfechas con las condiciones ambientales ya sea de frío de calor. La fórmula 2 se utiliza para calcular el PPD:

$$PPD=100-95. \exp^{(-0,03353oPMV4 -0,2179oPMV 2)} \quad (2)$$

#### 4.2.2. Encuesta

La encuesta se realizó los días 4 y 7 de abril del 2022, durante el periodo de transición frío-cálido. Antes de la aplicación del cuestionario, se instaló el equipo higrotérmico que midió datos de las 8:00 a.m. a las 4:00 p.m. revisando que el Se consideró que la permanencia de los alumnos fuera mínima 40 minutos antes encuestar a los alumnos. Antes de responder el cuestionario se apagaron las luces y mantuvieron las cortinas cerradas en el aula F-11, respetando como utilizan el espacio los ocupantes durante el horario de clases . El cuestionario autodirigido se aplicó utilizando la aplicación en línea Google Forms para ser respondido en los celulares de los estudiantes durante el horario de clases.

Para el tamaño de muestra se utilizó el programa Sample Size Calculator considerando un nivel de confianza del 95% con un intervalo de confianza de  $\pm 5$ . El tamaño de la muestra resulto ser de 173 alumnos.

El cálculo del PMV y PPD se realizó utilizando la aplicación en línea Ergonautas con el método de Fanger para evaluar el confort térmico [14]. El valor de la tasa metabólica elegida fue  $58 \text{ W/m}^2=1.0 \text{ met}$ , para una actividad pasiva, donde el sujeto se encuentra sentado en reposo [41]. Los valores del aislamiento térmico para las diferentes combinaciones de ropa fueron obtenidos del Anexo C, tabla C.1 de la ISO 7730.

equipo funcionara correctamente. Las mediciones de la velocidad del aire, temperatura radiante y de iluminancia se llevaron simultáneamente durante la aplicación del cuestionario.

#### 4.3. Recolección y análisis de datos

Se recolectaron 70,894 registros durante el período cálido (agosto 2021), frío (enero-febrero 2022), y dos periodos de transición de cálido a frío (octubre 2021) y transición frío-caliente ( abril de 2022). Los datos cuantitativos obtenidos de los resultados de las variables fueron capturados y analizados por medio de un análisis estadístico descriptivo por medias, por intervalo de sensación térmica y lumínica. Se utilizó el análisis de regresión lineal multivariable de la información colectada acuerdo con el periodo de estudio y los indicadores. Para realizar la ponderación y correlación de variables se utilizó como herramienta el programa estadístico IBM Statistics SPSS 21, para la validación del muestreo.



## 5. Resultados

### 5.1. Resultados mediciones físicas

La Tabla 5 resume los resultados de las mediciones de las variables ambientales realizadas durante en el periodo cálido-frío, indicando los valores mínimos (min), promedio (prom) y máximos (máx.) de cada indicador. Se encontró una diferencia de  $T_{ext}$  promedio de  $10^{\circ}C$  entre los días 1 ( $21^{\circ}C$ ) y 2 ( $31^{\circ}C$ ) y RH, 34% correspondiendo 43% el día 1 y 9% el día 2.

El día 1 hubo diferencias de temperatura promedio entre las aulas E-01 y E-08 de  $2^{\circ}C$  y  $1^{\circ}C$  entre la E-08 y F-11. En el día 2, la diferencia de temperatura promedio entre el aula E-03 y el E-08 fue de  $3^{\circ}C$  y con el aula F-11 de  $2^{\circ}C$ . Entre el aula E-08 y F-11 se registró una diferencia de  $5^{\circ}C$ . La  $T_{a\ int}$  más alta fue de  $31^{\circ}C$  registradas en aulas E-08 y F-11, con una diferencia de  $4^{\circ}C$  con la E-01 cuando la  $T_{ext}$  era de  $31^{\circ}C$ , con una HR

$int$  máxima de 94% y 80% respectivamente y  $HR_{ext}$  de 94%. La  $T_{ext}$  y  $Hr\ ext$  promedio en el periodo frío-cálido fue de  $22^{\circ}C$  y 49% respectivamente.

Los valores de aislamiento de la ropa (Icl) variaron en tres aulas dependiendo de la  $T_{a\ int}$ . Se observó que cuando  $T_{a\ int}$  estuvo entre  $18-20^{\circ}C$  en el aula E-01, se obtuvo un valor de 1.0 clo; al subir la temperatura a  $28^{\circ}C$  de 0.71 clo. Cuando la  $T_{a\ int}$  del aula E-08 estuvo entre  $18^{\circ}C$  y  $25^{\circ}C$  correspondió a un valor de 0.84 clo, y entre  $24^{\circ}C-25^{\circ}C$ , Icl de 0.62 clo. En el aula F-11 registró una  $T_{a\ int}$  entre  $18^{\circ}C$  y  $21^{\circ}C$  donde obtuvo un valor de 1.7 clo y entre  $28^{\circ}C$  y  $31^{\circ}C$  de 0.53 clo. Los valores para el tipo de arropamiento se obtuvieron de la respuesta de los encuestados. Resultaron valores diferentes en las tres aulas, observando que los valores más bajos y más altos de 0.53 y 1.7 clo correspondieron al aula F-11.

**Tabla 5.** Resultado de las variables medidas en el periodo de transición frío-cálido 2022

Aula	E-01		E-08		F-11	
	1	2	1	2	1	
<b>Día/</b>						
<b>Índice</b>	min, prom, máx.	min, prom, máx.	min, prom, máx.	min, prom, máx.	min, prom, máx.	min, prom, máx.
<b><math>T_{ext}</math> (<math>^{\circ}C</math>)</b>	17, 21, 24	26, 31, 36	17, 21, 24	26, 31, 36	17, 21, 24	26, 31, 36
<b><math>RH_{ext}</math> (%)</b>	20, 43, 71	7, 9, 12	20, 43, 64	7, 9, 12	20, 43, 66	7, 9, 12
<b>TGBH (<math>^{\circ}C</math>)</b>	15,16, 17	21, 21, 22	15, 15,15	23, 24, 25	16, 17, 17	*
<b>TG (<math>^{\circ}C</math>)</b>	18, 20, 21	28, 29, 29	18, 22, 22	24, 25, 26	20, 21, 22	28 ,31, 31
<b><math>T_{a\ int}</math> (<math>^{\circ}C</math>)</b>	18, 19, 20	28, 28, 28	18, 21, 25	24, 25, 25	18, 20, 21	28, 30, 31
<b><math>RH_{int}</math> (%)</b>	61, 62, 63	12, 14 , 15	22, 44, 66	22, 23, 25	58, 59, 66	16, 17, 21
<b><math>V_{aire}</math> (m/s)</b>	0	0.8	0	0	0	0.8
<b>Tasa metabólica (met)</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Icl (clo)</b>	1	0.71	0.84	0.62	1.7	0.53
<b>Iluminancia (lux)</b>	74, 86, 91	74, 86, 91	77, 102, 172	77, 102, 172	104, 113, 213	104, 113, 213

Nota: \* sin dato.

Abreviaturas: mínimo (min.), promedio (prom.) y máximo (máx.).

Temperatura exterior (Text)

Humedad Relativa exterior (HRExt),

Temperatura de globo y bulbo húmedo (TGBH)

Temperatura de globo (TG)

Velocidad del aire (Vaire)

Nivel de vestimenta (Icl)

Fuente: Elaboración propia.



## 5.2. Resultados confort térmico

Con base en la carta psicométrica para determinar la zona de confort en espacios naturalmente ventilados, en Valle de las Palmas se encuentra entre 19.7°C y 27.7°C y establece 50% HR (Climate consultant 5.5, 2014). La norma mexicana INIFED que determina para espacios educativos una temperatura de confort térmico entre 18°C y 25°C cuando la se tiene el 50% HR. Existe una diferencia de temperatura de 1.7°C en la temperatura más baja y de 2.7 en la más alta entre ambas estándares.

Los resultados obtenidos de  $T_{a \text{ int}}$  fueron de 18°C-28°C y  $HR_{\text{int}}$  entre 12% y 63% en el aula E-01 (orientado al NE, muro de tablaroca); de 18°C -25°C y  $HR_{\text{int}}$  entre 22% y 66% en el E-08 (orientado al SO, muro de piedra) y 18°C-31°C,  $HR_{\text{int}}$  entre 16% y 66% en el F-11 (orientado al SE, muro acristalado). El rango de  $T_{\text{ext}}$  en los dos días fue de 17°C- 36°C con  $HR_{\text{ext}}$  entre 7% and 71%. Estos resultados se encuentran fuera de los rangos establecidos por las normas. La Velocidad del aire  $V_{\text{aire}}$  en el día 1 fue 0 m/s, el día 2 fue de 0.8 m/s debido al uso de ventiladores y las puertas y ventanas permanecieron abiertas.

Se obtuvieron 181 respuestas de los alumnos encuestado, de los cuales el 60% pertenecían al género masculino y el 40% restante al femenino.. El peso estuvo en el rango de los 60-79 kg ; la altura entre 160-179 cm y la edad entre los 19-22 años. El 74% de los encuestados eran originarios de Tijuana, de los cuales el 66% Vivian en la zona este la ciudad (donde se localiza la UABC). El 66% de los estudiantes tenía de dos a cinco años estudiando en FCITEC.

Para la tasa metabólica se estableció el valor de 1.0 met, correspondiente a la actividad pasiva. Los valores del nivel de vestimenta o arropamiento (Icl), obtenidos de las respuestas de los alumnos variaron en las tres aulas en los dos días en que se aplicó el cuestionario.

En el aula E-01 el Icl fue de 1.0 clo, cuando la  $T_{a \text{ int}}$  estaba entre 18°C -20°C y de 0.71 clo a los 28°C. En el E-08 fue de 0.84 clo para una  $T_{a \text{ int}}$  de 18°C-25°C y de 0.62 clo a los 24°C-25°C, en el aula F-11, cuando la  $T_{a \text{ int}}$  estuvo en el rango de 58°C-66°C, el valor de Icl fue de 1,7 clo y para el rango entre 28°C-31°C fue de 0.53 clo.

Los resultados del Icl demuestran que los alumnos van ajustando su vestimenta para adaptarse a las condiciones térmicas del aula. La diferencia de 10°C en la  $T_{\text{ext}}$  durante los días en que se aplicó el cuestionario, la orientación y utilización de materiales de construcción son factores que pudieron influir en estos resultados.

De acuerdo con Ferrara [42], se puede decir que las diferentes orientaciones de las envolventes y diversos materiales de construcción de los edificios, como en este caso de estudio, presentaron diferentes valores de los índices medidos en cada una de las aulas.

### 5.2.1. Sensación Térmica (ST)

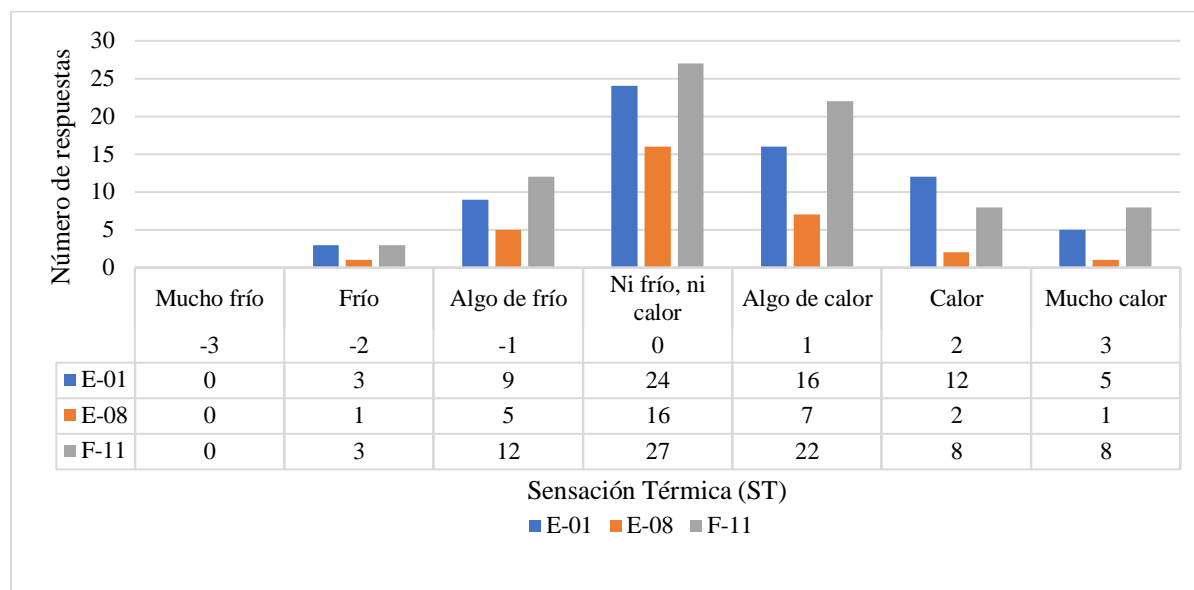
Durante aplicación del cuestionario, en dos días diferentes, los autores observaron el comportamiento de los alumnos donde el día 1, la  $T_{a \text{ int}}$  oscilo entre 18°C-25°C, se mantuvieron las ventanas y puertas cerradas y el ventilador apagado. En el día 2, la  $T_{a \text{ int}}$  registró 24°C-31°C, donde se mantuvieron puertas y ventanas abiertas y se prendió el ventilador en las aulas E-01 y F-11.

Además de los índices de  $T_a$  y HR, se registraron simultáneamente, además de la  $T_{a \text{ int}}$  y  $HR_{\text{int}}$ , la Temperatura de globo negro y bulbo húmedo, así como la velocidad del aire (registrados en la Tabla 3). La ocupación de las aulas promedio en el aula E-01 fue de 17 alumnos sentados en la zona central del aula; en el E-08 de diez estudiantes los cuales seleccionaron la zona derecha frente al pizarrón y en el F-11, el promedio fue de 27 estudiantes ocupando los asientos de las diferentes zonas del aulas.



La gráfica de la figura 7 muestra los resultados de la ST obtenidos de la encuesta de satisfacción realizada a estudiantes en el período de transición frío-cálido, donde se utilizó una escala de 7 puntos de ASHRAE. El 35% de los estudiantes del aula E-01 respondió estar en una situación neutra *ni frío, ni calor*; el 23% con *algo de calor*;

el 18% con *calor* y 13% con *algo de frío*. En el aula E-08, el 50% de los ocupantes respondió *ni frío ni, de calor*; el 22% *algo de calor* y el 16% *algo de frío*. En el aula F-11, el 34% de los ocupantes respondió *ni frío, ni calor*; el 27% *algo de calor* y el 15% *algo de frío*. Se observó que ninguno eligió la situación ambiental *mucho frío*.



**Figura 7.** Resultados sensación térmica (ST) periodo frío-cálido (elaboración propia).

Del total de respuestas de sensación térmica, el mayor porcentaje fluctuó entre 35-50% correspondiendo a la situación *ni frío, ni calor*. Los resultados en las aulas oscilaron entre 1 y -1 en la escala de sensación térmica.

En la Tabla 6 se presentan los datos obtenidos del cálculo de PMV y PPD determinando un porcentaje inconformidad ambiental entre el 15.91 y el 24.06% .

**Tabla 6.** Resultados del calculo del PMV y PPD.

Dia	Aula	Tr	PMV	PPD%
4 abril 2022	E-01	20	-0.95	24.06
7 abril 2022	E-01	31	0.43	8.86
4 abril 2022	E-08	22	0.87	20.98
7 abril 2022	E-08	25	-0.35	7.55
4 abril 2022	F-11	21	0.27	6.51
7 abril 2022	F-11	33	0.72	15.91

Fuente: Aplicación en línea [Ergonautas](#).





Los resultados del análisis de varianza ANOVA y de coeficiente de Pearson permitieron determinar las diferencias entre las medias de las variables utilizadas en el periodo de transición frío-cálido.

En la Tabla 7, se observa que el valor estadístico r de Pearson correspondió a .299, encontrándose una correlación significativa positiva débil entre

ST y la  $Ta_{int}$ , además, existe una asociación negativa débil pero significativa entre el ST y la  $HR_{int}$ ,  $r = -.297$ . El valor de  $r = -.948$ , es una correlación fuerte negativa entre la  $Ta_{int}$  y  $HR_{int}$  con significativa al nivel de 0.01 (bilateral), por lo que se puede afirmar con un 99% de confianza, que en el ámbito de estudio hay una correlación fuerte entre la variable  $Ta_{int}$  y la  $HR_{int}$ .

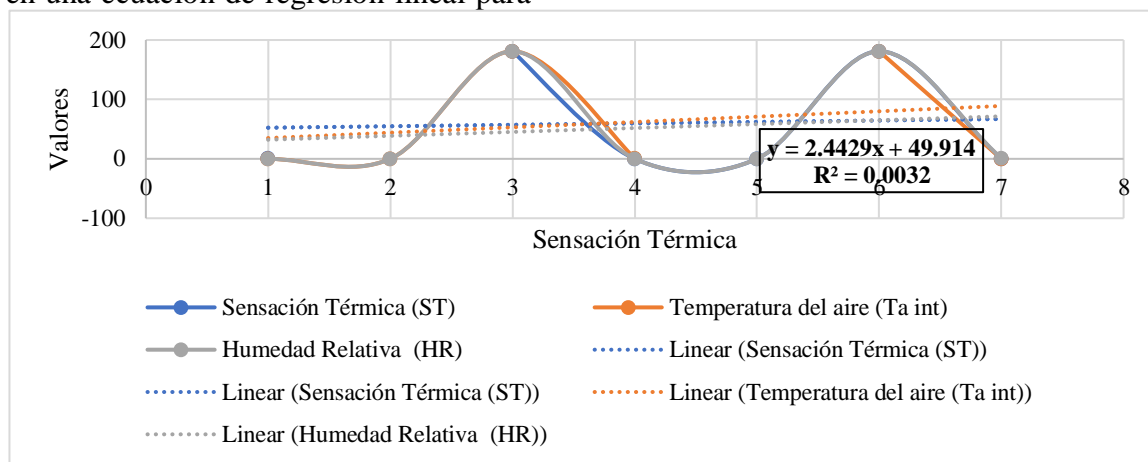
**Tabla 7.** Correlación de Pearson ST-  $Ta_{int}$  -  $HR_{int}$  periodo de transición frío-cálido

		Sensación Térmica (ST)	Temperatura del aire ( $Ta_{int}$ )	Humedad Relativa ( $HR_{int}$ )
<b>Sensación Térmica</b>	Correlación de Pearson	1	.299**	-.297**
	Sig. (bilateral)		.000	.000
	N	181	181	181
<b>Temperatura del aire (<math>Ta_{int}</math>)</b>	Correlación de Pearson	.299**	1	-.948**
	Sig. (bilateral)	.000		.000
	N	181	181	181
<b>Humedad Relativa (<math>HR_{int}</math>)</b>	Correlación de Pearson	-.297**	-.948**	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	
	N	181	181	181

\*\* La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral).  
Fuente: Elaboración propia.

La figura 8 muestra el diagrama de dispersión de la ST, donde el valor estadístico r de Pearson resultó en una ecuación de regresión lineal para

ST en la forma de  $y = 2.4429x + 49.914$ ,  $R^2 = 0.0032$ .



**Figura 8.** Correlación de Pearson ST- $Ta_{int}$  - $HR_{int}$  período de transición frío-cálido (elaboración propia).



### 5.2.2. Preferencia Térmica (PT)

La preferencia térmica (PT) se evaluó utilizando una escala de cinco puntos de Likert. La figura 9 resume los resultados de las respuestas de la PT de los estudiantes: en el aula E-01, el 52% preferían una situación térmica *mucho más fresca*; 26% *más fresco*; 13% *sin cambio*. En el

aula E-08, el 56% respondió *más fresco*; el 28% prefería *más cálido*; 16% *sin cambio*. En cuanto al aula F-11, el 65% prefirió *más fresco*; 13% *mucho más fresco* y 12% *más cálido*.

Se observó que la opción *mucho más cálido* no estuvo entre las preferencias de los alumnos en ninguna de las aulas.

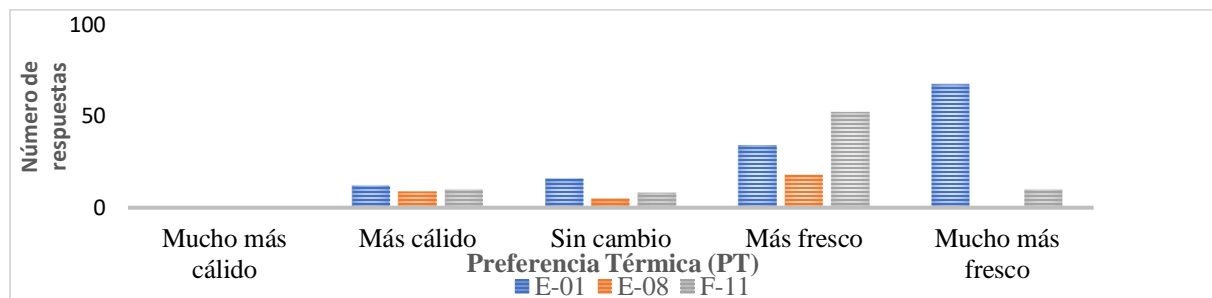


Figura 9. Resultados preferencia térmica (PT) periodo frío-cálido (elaboración propia).

En la Tabla 8, el valor estadístico  $r$  de Pearson es .274 entre PT y la  $Ta_{int}$ , encontrándose que es una correlación positiva débil significativa y un valor  $r$  -.221 entre PT y  $HR_{int}$  siendo una

asociación negativa débil significativa. También, se muestra el valor de  $r$  -.948, resultando una correlación fuerte negativa entre la  $Ta_{int}$  y  $HR_{int}$  con significativa al nivel de 0.01 (bilateral).

Tabla 8. Correlación de Pearson PT-  $Ta_{int}$  - $HR_{int}$  periodo de transición frío-cálido

		Preferencia Térmica (PT)	Temperatura del aire ( $Ta_{int}$ )	Humedad Relativa ( $HR_{int}$ )
<b>Preferencia Térmica (PT)</b>	Correlación de Pearson	1	.274**	-.221**
	Sig. (bilateral)		.000	.003
	N	181	181	181
<b>Temperatura del aire (<math>Ta_{int}</math>)</b>	Correlación de Pearson	.274**	1	-.948**
	Sig. (bilateral)	.000		.000
	N	181	181	181
<b>Humedad Relativa (<math>HR_{int}</math>)</b>	Correlación de Pearson	-.221**	-.948**	1
	Sig. (bilateral)	.003	.000	
	N	181	181	181

\*\* La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia.



En la figura 10 del gráfico de dispersión se establecen ecuaciones de regresión para TP en forma de  $y=6.7168x + 31.897$  y  $R^2=0.0367$ .

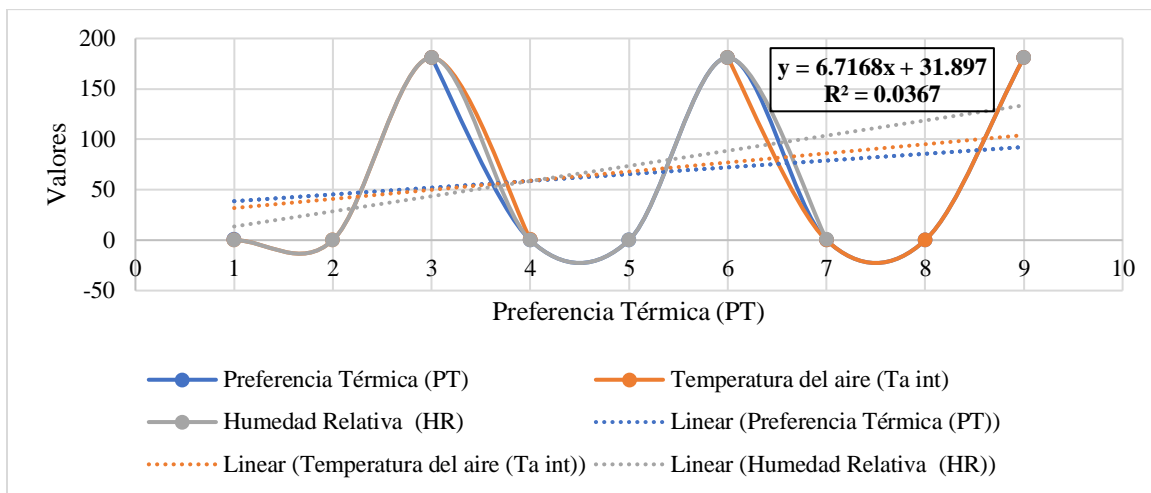


Figura 10. Correlación de Pearson PT-  $Ta_{int}$  - $HR_{int}$  período de transición frío-cálido (elaboración propia).

### 5.2.3. Tolerancia Térmica (TT)

Los resultados de las respuestas de TT se resumen en la figura 11, indicando que en el aula E-01 55% consideró *tolerable* la situación térmica; el 26% *ligeramente tolerable* y el 12% como *intolerable*. En el aula E-08, el 72% la

encontró *tolerable*; 16% *ligeramente tolerable* y 12% *intolerable*. En el aula F-11, el 58% de los usuarios se mostró *tolerante* ante las condiciones térmicas; el 16% respondió *levemente tolerable* y el 16% *intolerable* al TT.

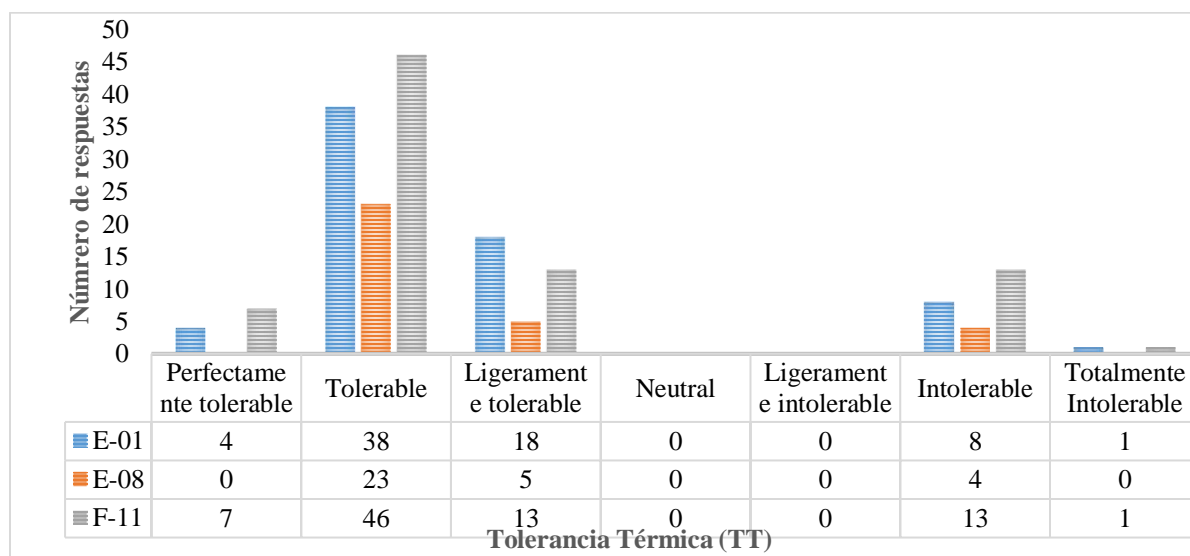


Figura 11. Resultados tolerancia térmica (TT) periodo frío-cálido (elaboración propia).



La tabla 9 de TT muestra que el valor estadístico de Pearson es .175; además, esta correlación es significativa. Por lo tanto, se puede afirmar con un 95% de confianza que existe una correlación

positiva *débil* entre las dimensiones TT y Ta<sub>int</sub>. El coeficiente  $r = -.182$  es una asociación significativa y una correlación negativa *débil* entre TT y HR.

**Tabla 9.** Correlación de Pearson TT- Ta<sub>int</sub>-HR<sub>int</sub> periodo de transición frío-cálido

		Tolerancia Térmica (TT)	Temperatura del aire (Ta int)	Humedad relativa (HR int)
<b>Tolerancia Térmica (TT)</b>	Correlación de Pearson	1	.175*	-.182*
	Sig. (bilateral)		.019	.014
	N	181	181	181
<b>Temperatura del aire (Ta int)</b>	Correlación de Pearson	.175*	1	-.948**
	Sig. (bilateral)	.019		.000
	N	181	181	181
<b>Humedad relativa (HR int)</b>	Correlación de Pearson	-.182*	-.948**	1
	Sig. (bilateral)	.014	.000	
	N	181	181	181

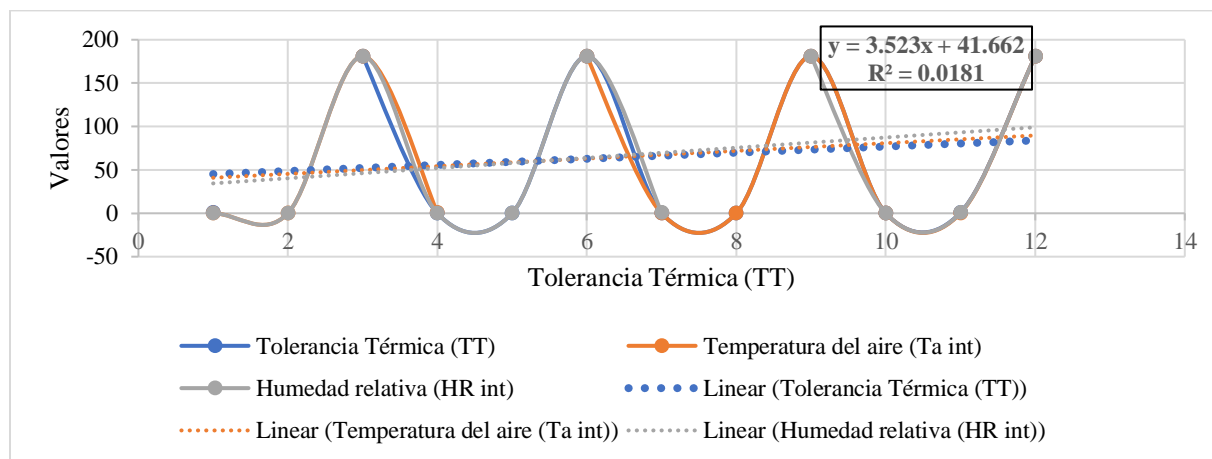
\*. La correlación es significativa al nivel 0.05 (bilateral).

\*\*. La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones de regresión para TT, como determina el grafico de la figura 12, resultaron en la forma de  $y = 6.7144 x + 31.898$ ,  $R^2=0.0367$ .

Además,  $r = -.948$  es una correlación significativa al nivel 0.05 (bilateral). Existe una asociación fuerte negativa entre Ta<sub>int</sub> y HR.



**Figura 12.** Correlación de Pearson TT- Ta<sub>int</sub>-HR<sub>int</sub> periodo de transición frío-cálido (elaboración propia).



### 5.3. Discusión confort térmico

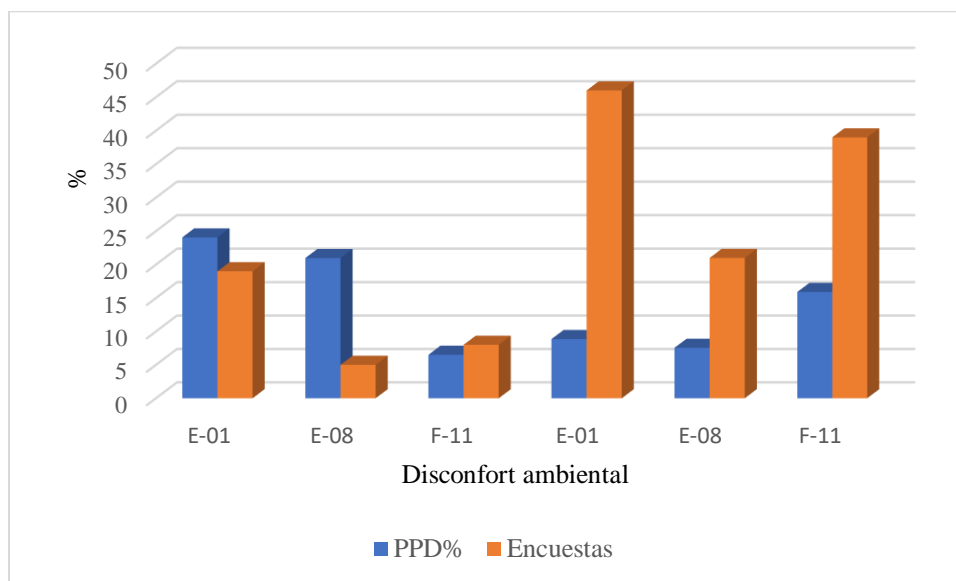
Los resultados en esta investigación revelaron información importante sobre cómo los estudiantes perciben, prefieren y toleran las condiciones ambientales térmicas del aula para realizar sus actividades de aprendizaje durante las horas de clase.

Los valores de las encuestas aplicadas durante las clases presenciales mostraron que 50-66% de los estudiantes se encontraban en una situación de 24.06%, mientras que los porcentajes obtenidos de las respuestas de satisfacción correspondió entre el 5 y 19%. El día 2, el PPD fue 7.55 y 15.91% y los datos de la encuesta se elevaron excesivamente perteneciendo al 21 y 46%. Resumiendo, los valores obtenidos del cálculo

incomodidad. Este porcentaje fue consistente con las Zonas Adaptativas de Confort de ASHRAE, ya que los estudiantes sintieron el ambiente térmico *algo frío* cuando la temperatura estaba por debajo de los 19.7 °C y con *algo de calor* al incrementarse más de 27.7 °C.

Los porcentajes obtenidos del cálculo de PPD y los resultados de las encuestas son mostrados en la figura 13 de disconfort ambiental. El día 1 el PPD fue de 6.51 y

PPD fueron 15.91-24.06%, y de la encuesta 19-46 %. De acuerdo con la ISO 7730, para que las condiciones ambientales sean adecuadas el PMV debe estar entre -0.5 y 0.5, por lo tanto, la situación de las aulas es ambientalmente inadecuada.



**Figura 13.** Resultados del cálculo PPD y respuestas de las encuestas de satisfacción (elaboración propia).

Se observó que la orientación y el sistema constructivo de los edificios influyeron considerablemente en la sensación térmica ambiental [14]. Al comparar los resultados de las tres aulas, los ocupantes del salón F-11 tuvieron el porcentaje más bajo de sensación neutra y

mostraron más sensibilidad cuando la temperatura aumenta que cuando disminuye.

Esta sensación térmica del aula F-11 podría deberse a la fachada sur acristalada que recibe 7 horas de radiación solar, dada la superficie de vidrio de piso a plafón en todo el muro, lo cual





podría causar la incomodidad térmica durante el horario de clase. También, podría influir que este ventanal no se puede abrir para permitir la circulación de aire directamente desde el exterior cuando los estudiantes permanecen tres horas consecutivas de clase.

La preferencia térmica en el aula F-11 resultó ser que 78% de los alumnos preferían temperaturas más bajas, correspondiendo el 65% a más fresco y 13% mucho más fresco. Esto puede deberse a que la temperatura exterior estuvo en un rango entre 28°C-31°C, superando en 3.3°C los rangos de confort. Además, debe considerarse que la ocupación fue la más alta, 20 alumnos promedio durante la aplicación del cuestionario. Esto pudiera ser un factor para considerar en las condiciones ambientales que difieren de las otras aulas.

Más del 50% de los encuestados consideró tolerable la situación térmica. El resultado podría corresponder a que el 48% de los estudiantes viven en zonas cercanas a la universidad y su adaptación al clima [18]. El resto del porcentaje se divide entre los que viven en zonas más cercanas al Océano Pacífico o nació en otra ciudad. Por lo tanto, las respuestas adaptativas de los ocupantes locales jugaron un papel significativo y positivo en el procedimiento para tolerar los parámetros ambientales interiores, a diferencia de los migrantes.

#### 5.4. Resultados confort lumínico

En la figura 14 se muestran los resultados de las mediciones de luz natural que se llevaron a cabo los dos días de encuestas, considerando un horario 9:00 a.m. a 15:00 p.m. Los valores promedio obtenidos de la luz natural el 4 de abril, en horario de 9:00–11:00 a.m. resultaron ser para el aula E-01 de 158 lux, con un valor máximo de 243 lux; en el E-08 de 132 lux, con

De acuerdo con los resultados sobre la pregunta de opinión “¿Cuáles factores ambientales son los que más afectan en el desarrollo de sus actividades en el aula? El 45% de los estudiantes respondieron que el confort térmico.

Los resultados mostraron que abrir ventanas y puertas, así como usar el ventilador no es suficiente para cubrir las expectativas de los alumnos del ambiente térmico del aula ventilada naturalmente en la localidad de Valle de las Palmas.

Considerando que el periodo en que se realizó el estudio es de transición, donde las temperaturas no corresponden a las más bajas, ni las más altas de los periodos del año, se obtuvieron porcentajes de incomodidad ambiental en los alumnos para desarrollar sus actividades de aprendizaje.

Estudios similares argumentan que la orientación del edificio y al uso de los materiales influyen en la respuesta de los estudiantes [14]. Además de los parámetros climáticos debe considerarse también la adaptación de los estudiantes al ambiente térmico que depende del lugar de procedencia y sus expectativas [21], [43].

Todos estos factores ambientales deben considerarse en las estrategias de diseño para mejorar las condiciones térmicas de las aulas y el bienestar de los alumnos para que realicen sus actividades de aprendizaje de manera óptima.

un máximo de 154 lux y en el aula F-11 fue de 315 lux, con máximo de 362 lux. En el horario de la tarde, en el E-01 se obtuvieron 161 lux promedio con un valor máximo de 180 lux; en el E-08 fue de 270 lux y máximo de 276 lux; en el F-11 de 106 lux, máximo 102 lux.



Los valores promedio el 7 de abril, en horario de la mañana, resultaron ser en el aula E-01, 225 lux, con un valor máximo de 301 lux; en el E-08 de 142 lux, con un máximo de 173 lux y en el aula F-11 fue de 315 lux, con máximo de 374 lux. En el horario de la tarde, en el E-01 se obtuvieron 191 lux promedio con un valor máximo de 254 lux; en el E-08 fue de 264 lux y máximo de 293 lux; en el F-11 de 112 lux, máximo 188 lux. Se observó que los valores más altos, correspondían

a las mediciones registradas en puntos cercanos a las ventanas.

De acuerdo con las normas internacionales (ISO:2008) y mexicanas (INIFED 2011; NOM-025-STPS: 2008), casi el 90% de los valores de la luz natural se encuentran por debajo del mínimo requerido de 300 lux para aulas educativas.

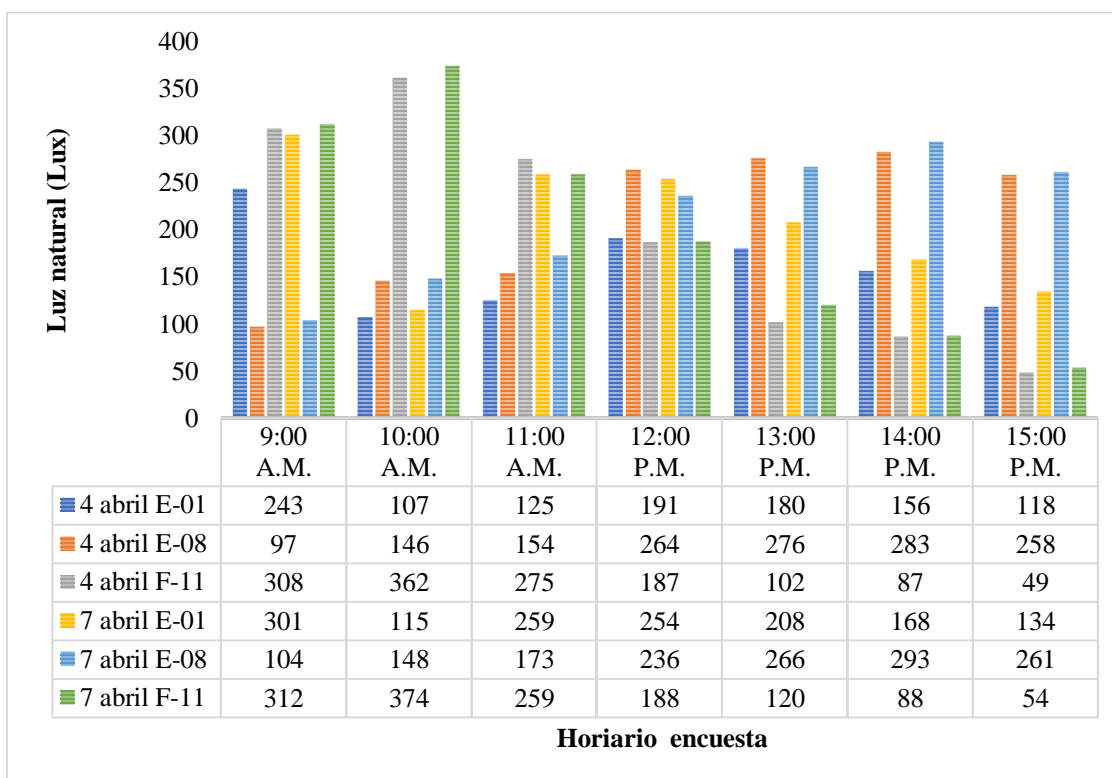


Figura 14. Resultados de iluminancia periodo de transición frío-cálido (elaboración propia).

### 5.4.1. Percepción Luz Natural (PLN)

La figura 15 resume los resultados de las respuestas de PLN, donde 30% de los estudiantes del aula E-01 perciben poca luz; 29% suficiente luz y 20% normal. El 38% de los alumnos del aula E-08 iluminada; 28% con poca luz y 22% con suficiente luz; y, el 39% de los encuestados

en el salón F-11 respondieron suficiente luz, 26% con iluminada, 15% con poca luz y 14% con mucha luz. En este caso, la respuesta poco oscuro y muy oscuro tuvo un tercio del total de las respuestas.

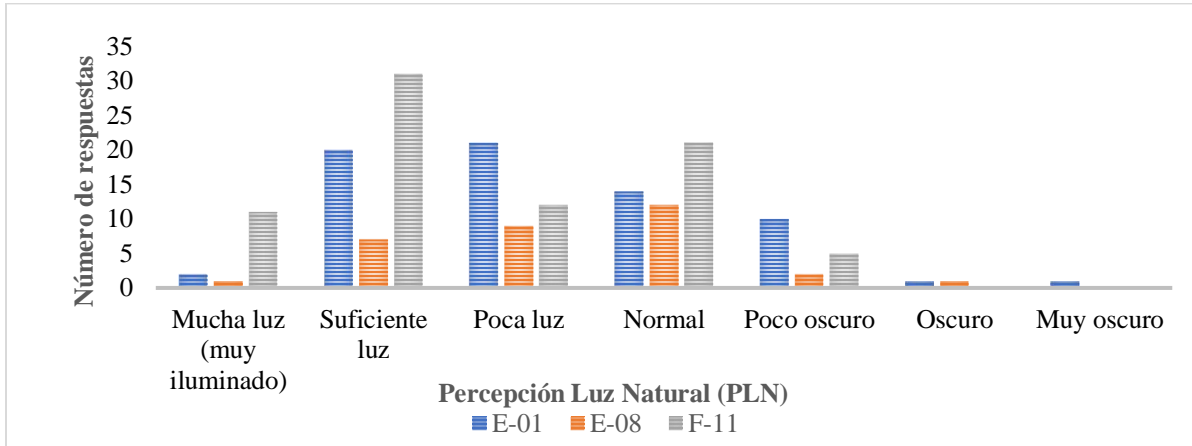


Figura 15. Resultados de percepción de luz natural (PLN) periodo de transición frío-cálido (elaboración propia).

### 5.4.2. Preferencia Lumínica (PL)

La figura 16 muestra el resultados de la (PL) de los encuestados, donde el 41% de los estudiantes en el aula E-01 respondieron *ningún cambio*; 39% *más iluminación* y 16% *mucho más iluminación*. En el salón E-08, el 53% de los

estudiantes seleccionó la situación *sin cambio*, y el 44% respondió *más luz*; en el salón F-11, el 49% de los usuarios prefirió *sin cambio*; 34% *más iluminación* y 14% *menos iluminación*. Más del 40 % de los estudiantes de las tres aulas prefirieron *sin cambio* en las condiciones de iluminación y más del 30 % *más iluminación*.

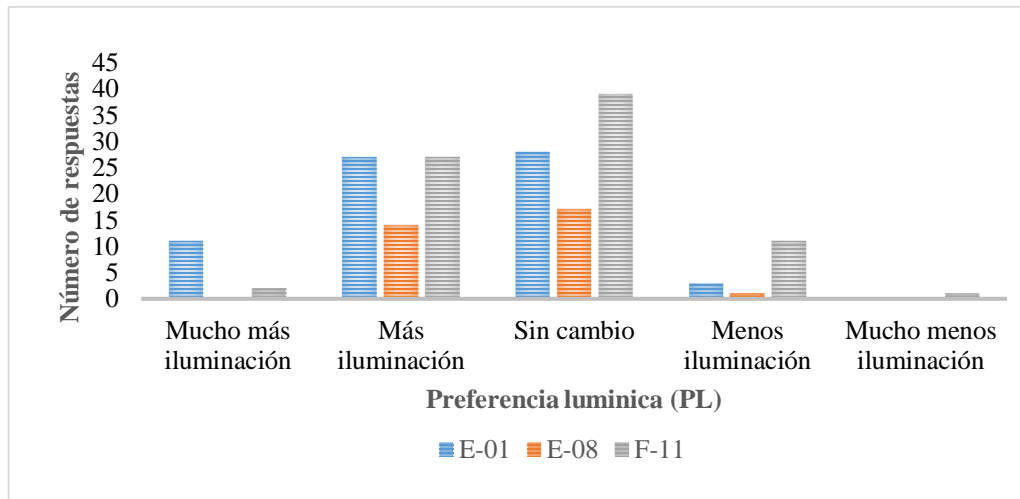


Figura 16. Resultados de preferencia lumínica periodo de transición frío-cálido (elaboración propia).

La Tabla 9 muestra que el coeficiente de Pearson es .136 y el valor de significancia bilateral es

0.01, lo cual es una correlación positiva muy débil entre las variables.



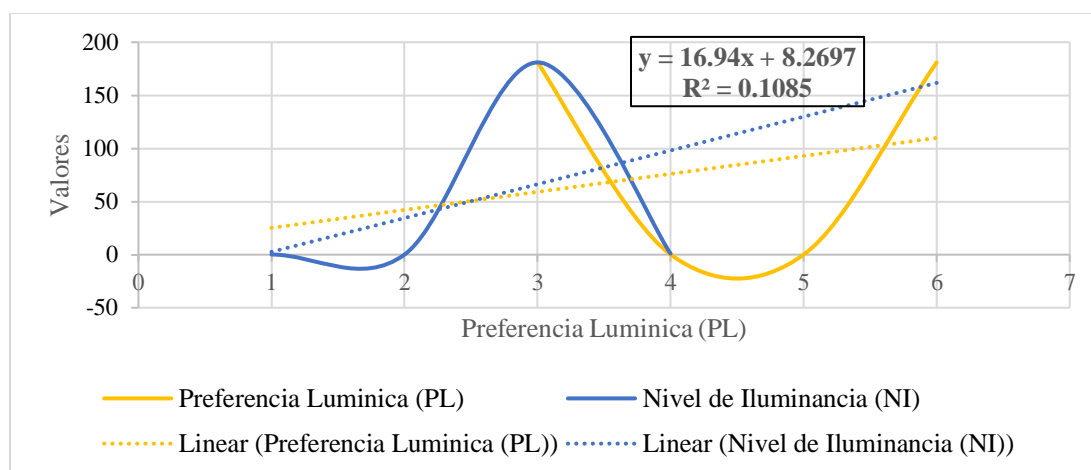
**Tabla 9.** Correlación de Pearson PL-NI periodo de transición frío-cálido

		Preferencia Lumínica (PL)	Nivel de Iluminancia (NI)
<b>Preferencia Lumínica (PL)</b>	Correlación de Pearson	1	.136
	Sig. (bilateral)		.068
	N	181	181
<b>Nivel de Iluminancia (NI)</b>	Correlación de Pearson	.136	1
	Sig. (bilateral)	.068	
	N	181	181

\*\* La correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral).

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico de la figura 17 se determina las ecuaciones de regresión para PL en la forma de  $y = 16.94x + 8.2697$ ,  $R^2 = 0.1085$ .

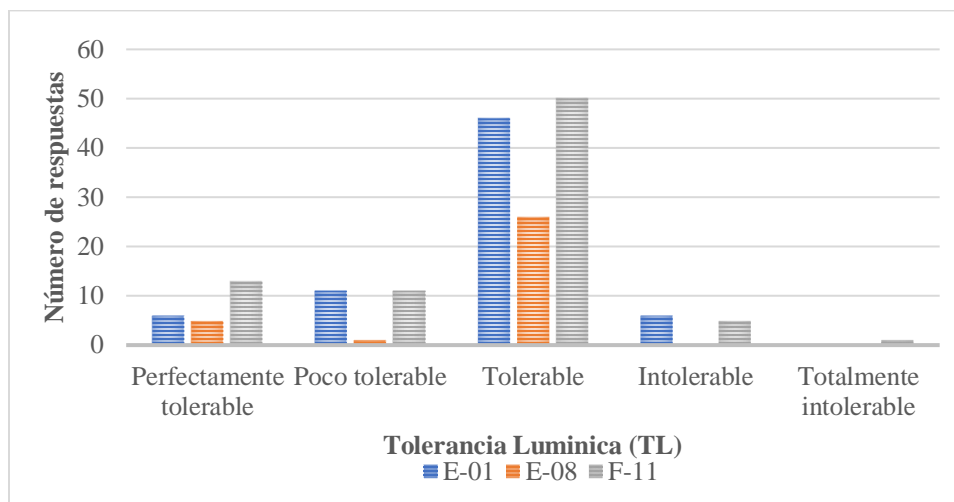


**Figura 17.** Correlación de Pearson PL-NI periodo transición frío- cálido.

### 5.4.3. Tolerancia Lumínica (TL)

Los resultados de la encuesta indicados en la figura 18 mostraron que el 66% de los estudiantes en el aula E-01 consideraron la situación *tolerable*; 16% respondió *poco tolerable*; y se obtuvo un 9% para cada una de las respuestas *intolerable* y *perfectamente tolerable*. El 81% de los alumnos del salón E-08 consideró la opción *tolerable*, el 16%

*perfectamente tolerable* y el 3% *poco tolerable*. En el aula F-11 el 63% respondió *tolerable* a la situación lumínica, 16% respondió *perfectamente tolerable*, y el 14% *poco tolerable*. Más del 67.4% de los estudiantes eligió *tolerable* las condición lumínica de las aulas.



**Figura 18.** Tolerancia Lumínica (TL) periodo de transición frío-cálido (elaboración propia).

En la tabla 10 se observa que el coeficiente de correlación “r” de Pearson es -.124 es decir que existe una correlación negativa débil. Sin embargo, el valor de la significancia bilateral es

de .09 que es superior al 0.05 requerido para validar la asociación entre ambas variables por lo que se resume que no existe correlación entre las variables.

**Tabla 10.** Correlación de Pearson TL-NI periodo de transición frío-cálido.

		Tolerancia lumínica (TL)	Nivel Iluminancia (NI)
<b>Tolerancia lumínica (TL)</b>	Correlación de Pearson	1	-.124
	Sig. (bilateral)		.096
	N	181	181
<b>Nivel luminancia (NI)</b>	Correlación de Pearson	-.124	1
	Sig. (bilateral)	.096	
	N	181	181

Fuente: Elaboración propia

Además, el análisis no identificó diferencias estadísticamente significativas entre las variables PLN, PL o TL asociadas con el nivel de luz natural o variables higrotérmicas. En conclusión, no existe correlación entre estas variables.

### 5.5. Discusión confort lumínico

No obstante, que se seleccionaron dos días soleados para aplicar el cuestionario, las mediciones físicas registraron valores promedio de luz natural por debajo de los estándares en los nueve puntos de medición, 300 lux para aulas educativas. En aula E-08 se registraron más de 10,000 lux en puntos cercanos a las ventanas SO los cuales no fueron considerados por la





incidencia solar directa sobre el sensor. En un caso similar se obtuvieron más de 1500 Lux, lo que podría producir deslumbramiento y aumentar el malestar térmico debido a la alta radiación solar[6].

Según la percepción de más del 60% de los estudiantes, las aulas no cuentan con la iluminación de luz natural adecuada para llevar a cabo sus actividades de aprendizaje. Esto podría deberse al tipo de apertura y falta de tratamiento de ventanas que controlen la entrada de luz natural, así como a la orientación de la envolvente del edificio. Los resultados mostraron que 60% de alumnos que prefieren diferentes condiciones de iluminación a las existentes. Sin embargo, casi el 70% consideró tolerable la situación lumínica. Esto podría deberse a la edad de los estudiantes, entre 19-22 años, a la posibilidad de elegir donde sentarse, la movilidad dentro del aula y a que tienen la opción de tener el control de prender la luz eléctrica.

## 6. Conclusiones

En este estudio se evaluaron las condiciones ambientales térmicas y lumínicas en tres aulas universitarias de la UABC de Valles de las Palmas, Tijuana. Se obtuvieron 181 respuestas de los alumnos encuestados durante el horario de clase. Los resultados fueron comparados con las normas internacionales y nacionales.

Se observaron varios problemas relacionados con la incomodidad térmica y lumínica en las aulas durante el período de transición frío-calor, el cual presentó cambios climáticos drásticos.

La sensación térmica de los estudiantes se encontró entre -1 y +1 (algo de frío-algo de calor) a una temperatura mayor de 27.8°C, mostrando mayor sensibilidad térmica al aumentar la temperatura interior.

Los porcentajes del cálculo del PPD, de acuerdo con la norma ISO 7730, fueron distintos en los dos días de la aplicación de los cuestionarios debido a las condiciones ambientales de las aulas que variaron durante la investigación. Se encontró que los resultados de las encuestas de satisfacción difieren considerablemente en el día 2, donde se presentaron las temperaturas más altas, duplicando los porcentajes de insatisfacción del cálculo PPD. El día 1 el porcentaje fue menor en 3% que el de las encuestas.

Estas diferencias en la estimación pueden deberse a la no dependencia de sistemas de aire acondicionado y a la adaptación de los estudiantes al clima local, ajustando su vestimenta dependiendo de las condiciones térmicas del ambiente interior, a la orientación y uso de materiales de construcción en el edificio.

Las condiciones de iluminancia de las aulas no garantizan el nivel suficiente de luz natural en las aulas durante el periodo de transición frío-cálido ya que se registraron valores de luz natural por debajo del mínimo establecido por la normatividad de 300 lux en las tres orientaciones. En aulas con orientaciones SE y SO el exceso de penetración de luz directa causa falta de uniformidad, deslumbramiento y sobrecalentamiento en los asientos cercanos a las ventanas que dan al exterior.

Lo anterior ha provocado que se mantengan las cortinas cerradas en el aula F-11, lo que pudiera originar problemas visuales y privar a los estudiantes de la comunicación directa con el exterior. Además, se hace uso de la luz eléctrica durante todo el horario de clases, aun cuando los alumnos prefieren la luz natural para realizar sus tareas de educativas.

De los factores ambientales, los alumnos votaron al confort térmico con mayor impacto al momento de realizar su proceso de aprendizaje.



También, se concluye que existe una fuerte correlación negativa entre  $Ta_{int}$  y la  $HR_{int}$ , estableciéndose la ecuación de regresión para ST en la forma de  $y=3.5013x+41.749$ , además, se encontró una correlación positiva muy débil entre PL y NPL. Las ecuaciones de regresión para PL se establecieron como  $y = 16.94x+8.2697$ ,  $R^2=0.1085$ . El análisis estadístico no identificó diferencias significativas entre las variables NPL, PL o TL asociadas a los niveles de iluminancia ni a las variables higrotérmicas, por lo que se determinó que no existe correlación entre estas variables. Con los datos obtenidos se cumplió el objetivo principal de evaluar las condiciones térmicas y lumínicas ambientales en aulas universitarias del FCITEC, permitiendo determinar que las condiciones ambientales presentan una situación ambientalmente inadecuadas para que los alumnos desarrollen sus actividades de aprendizaje de manera óptima.

La metodología de evaluación multicriterio aplicada en esta investigación se suma al enfoque holístico para estudio de la calidad ambiental en espacios educativos. La obtención de datos reales sobre las condiciones ambientales de las aulas puede ayudar a los profesionales de la arquitectura e ingeniería a establecer estrategias de diseño en términos de orientación, sistema constructivo y condiciones ambientales para nuevas edificaciones y mejoramiento de las ya existentes en Valle de las Palmas y otras localidades con las mismas características climáticas.

Para el edificio E y F del FCITEC, los autores recomiendan realizar estudios sobre un tratamiento eficaz en ventanas en todas las orientaciones, así como incluir otros factores ambientales como el acústico y la calidad del aire en diferentes periodos del año que permita conocer cuál es el impacto real en el aprovechamiento de los alumnos.

## 7. Reconocimiento:

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) para la subvención otorgada para llevar a cabo esta investigación y de FCITEC para facilitar el acceso a las instalaciones.

## 8. Reconocimiento de autoría

*María Teresa de la Cruz-Chaidez*: Desarrollo y administración de la Investigación, Metodología, Análisis, Redacción. *José Francisco Armendáriz-López*: Dirección y coordinación de la investigación, Metodología, Redacción, Supervisión. *Francisco José Martín del Campo-Saray*: Dirección, Metodología, Análisis, Redacción. *Miguel Isaac Sahagún-Valenzuela*: Metodología, Redacción, Supervisión, Financiamiento. *Maria Cristina Castanón-Bautista*: Metodología. *Cármén García-Gómez*: Dirección, Metodología.



## Referencias

- [1] Secretaría del Trabajo y Prevision Social, "Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008. Condiciones de iluminación en los centros de trabajo." pp. 1-13, 2008.
- [2] UNE 12464.1, "Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places." 2022.
- [3] P. Barrett, Zhang Yufan, Davies Fay, and Barrett Lucinda, "Clever Classrooms - Summary Report of the HEAD Project," Blackpool, Hampshire and the London Borough of Ealing., 2015. [Online]. Available: <http://usir.salford.ac.uk/35221/>.
- [4] S. S. Korsavi, A. Montazami, and D. Mumovic, "The impact of indoor environment quality (IEQ) on school children's overall comfort in the UK; a regression approach," *Build. Environ.*, vol. 185, no. June, p. 107309, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107309>
- [5] S. Vilcekova, et al., "Indoor environmental quality of classrooms and occupants ' comfort in a special education school in Slovak Republic," *Build. Environ.*, vol. 120, pp. 29-40, 2017.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.001>
- [6] E. L. Krüger and P. H. T. Zannin, "Acoustic, thermal and luminous comfort in classrooms," *Build. Environ.*, vol. 39, no. 9, pp. 1055-1063, 2004.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.01.030>
- [7] A. Merabtine, C. Maalouf, A. Al, W. Hawila, N. Martaj, and G. Polidori, "Building energy audit, thermal comfort, and IAQ assessment of a school building: A case study," *Build. Environ.*, pp. 1-33, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.015>
- [8] P. Barrett, Y. Zhang, F. Davies, and L. Barrett, *Clever Classrooms - Summary Report of the HEAD Project*, no. February. 2015.
- [9] A. Sadick and M. H. Issa, "Assessing physical conditions of indoor space enclosing elements in schools in relation to their indoor environmental quality," *J. Build. Eng.*, vol. 20, no. August, pp. 520-530, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.08.018>
- [10] ISO 7730:2005, "ISO 7730:2005. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria." Suiza, p. 49, 2005.
- [11] S. Aghniaey et al., "Thermal comfort evaluation in campus classrooms during room temperature adjustment corresponding to demand response," *Build. Environ.*, vol. 148, pp. 488-497, Jan. 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.11.013>
- [12] R. De Dear, G. Brager, and D. Cooper, "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference," *ASHRAE Trans.*, no. March, pp. 1-297, 1997, [Online]. Available: [https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6.pdf%5Cnhttp://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6.pdf%5Cnhttp://repositories.cdlib.org/cedr/cb/e/ieq/deDear1998\\_ThermComPref](https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6.pdf%5Cnhttp://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6.pdf%5Cnhttp://repositories.cdlib.org/cedr/cb/e/ieq/deDear1998_ThermComPref).



- [13] INIFED, "Normas y Especificaciones para Estudios Proyectos Construcción e Instalaciones," *Infraestruct. Educ. INIFED*, vol. 3, no. Tomo I. Diseño Arquitectónico, pp. 1-26, 2011, [Online]. Available: <https://www.gob.mx/inifed/acciones-y-programas/normatividad-tecnica>.
- [14] A. Anguita, J. Arco, and D. Hidalgo, "Estudio del confort térmico en las aulas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada . Study of thermal comfort in the classrooms of the Technical School of Building Engineering of the University of Granada.," *An. Edif.*, vol. 4, pp. 55-64, 2018. <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3853>
- [15] I. I. El-Darwish and R. A. El-Gendy, "Post occupancy evaluation of thermal comfort in higher educational buildings in a hot arid climate," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 3167-3177, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.11.008>
- [16] M. Fabozzi and A. Dama, "Field study on thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned university classrooms," *Indoor Built Environ.*, vol. 29, no. 6, pp. 851-859, 2020. <https://doi.org/10.1177/1420326X19887481>
- [17] A. Jindal, "Thermal comfort study in naturally ventilated school classrooms in composite climate of India," *Build. Environ.*, vol. 142, no. May, pp. 34-46, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.051>
- [18] A. K. Mishra and M. Ramgopal, "A thermal comfort field study of naturally ventilated classrooms in," *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 396-406, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.024>
- [19] S. P. Corgnati, R. Ansaldi, and M. Filippi, "Thermal comfort in Italian classrooms under free running conditions during mid seasons: Assessment through objective and subjective approaches," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 4, pp. 785-792, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.023>
- [20] M. A. Nico, S. Liuzzi, and P. Stefanizzi, "Evaluation of thermal comfort in university classrooms through objective approach and subjective preference analysis," *Appl. Ergon.*, vol. 48, pp. 111-120, May 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.11.013>
- [21] R. Yao, J. Liu, and B. Li, "Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 3, pp. 1015-1022, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.028>
- [22] S. Subhashini and K. Thirumaran, "A passive design solution to enhance thermal comfort in an educational building in the warm humid climatic zone of Madurai," *J. Build. Eng.*, vol. 18, pp. 395-407, Jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2018.04.014>
- [23] R. L. Hwang, T. P. Lin, and N. J. Kuo, "Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan," *Energy Build.*, vol. 38, pp. 53-62, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.001>
- [24] J. Liu, X. Yang, Q. Jiang, J. Qiu, and Y. Liu, "Occupants' thermal comfort and perceived air quality in natural ventilated



classrooms during cold days," *Build. Environ.*, vol. 158, no. May, pp. 73-82, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.011>

[25] C. Buratti, D. Palladino, and E. Moretti, "Prediction of Indoor Conditions and Thermal Comfort Using CFD Prediction of Indoor Conditions And Thermal Comfort Simulations: A Study Based on Experimental Data Simulations: A Case Study Based On," *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 115-122, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.130>

[26] N. Giraldo, M. Longhinotti, F. O. R. Pereira, and A. Kuhnén, "Luminous and visual preferences of young children in their classrooms: Curtain use, artificial lighting and window views," *Build. Environ.*, vol. 152, no. September 2018, pp. 59-73, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.049>

[27] M. B. C. Aries, "Human Lighting Demands, healthy lighting in an office environment," *Tech. Univ. Eindhoven 2005*, no. 2005, p. 158, 2005. <http://dx.doi.org/10.6100/IR594257>.

[28] P. Barrett, F. Davies, Y. Zhang, and L. Barrett, "The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis," *Build. Environ.*, vol. 89, pp. 118-133, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.013>

[29] R. E. Corvalán et al., "Iluminación y confort en las aulas y laboratorios de carreras técnicas de grado universitario," *Extensionismo, Innovación y Transf. Tecnológica*, vol. 2, no. June, pp. 98-105, 2015. <https://doi.org/10.30972/eitt.20292>

[30] A. A. Y. Freewan and J. A. Al Dalala, "Assessment of daylight performance of Advanced Daylighting Strategies in Large University Classrooms; Case Study Classrooms at JUST," *Alexandria Eng. J.*, vol. 59, no. 2, pp. 791-802, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.049>

[31] K. S. Galal, "The impact of classroom orientation on daylight and heat-gain performance in the Lebanese Coastal zone," *Alexandria Eng. J.*, vol. 58, no. 3, pp. 827-839, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.07.003>

[32] S. Secchi, F. Scurpi, L. Pierangioli, and M. Randazzo, "Retrofit strategies for the improvement of visual comfort and energy performance of classrooms with large windows exposed to East," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3144-3149, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.771>

[33] A. Michael and C. Heracleous, "Assessment of natural lighting performance and visual comfort of educational architecture in Southern Europe: The case of typical educational school premises in Cyprus," *Energy Build.*, vol. 140, pp. 443-457, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.087>

[34] P. Ricciardi and C. Buratti, "Environmental quality of university classrooms: Subjective and objective evaluation of the thermal, acoustic, and lighting comfort conditions," *Build. Environ.*, vol. 127, no. August 2017, pp. 23-36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.030>

[35] Korsavi Sepideh S., Zomorodian Zahra Sadat, and M. Tahsildoost, "Visual comfort assessment of daylight and sunlit areas: A longitudinal field survey in classrooms in





Kashan, Iran," Energy Build., vol. 128, pp. 305-318, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.091>

[36] International Organization for Standardization, "Iso 7726:1998. Ergonomics of the thermal environment-Instruments for measuring physical quantities," Ergonomics, vol. 1998, 1998.

[37] C. Heracleous and A. Michael, "Experimental assessment of the impact of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort conditions of educational buildings in the Eastern Mediterranean region during the heating period," J. Build. Eng., 2019. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100917>

[38] N.-025-S.-2008 Secretaria del Trabajo y Previsión Social, "NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.," 2008.

[39] I. Standard, "ISO 7726," Ergonomics, vol. 1998, 1998.

[40] J. A. Diego-Mas, "Evaluación del confort térmico con el método de Fanger." 2015.

[41] ISO 7730, "Moderate thermal environments: Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort," Management, vol. 2. p. 26, 1994.

[42] M. Ferrara, E. Sirombo, and E. Fabrizio, "Automated optimization for the integrated design process: the energy, thermal and visual comfort nexus," Energy Build., vol. 168, pp. 413-427, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.039>

[43] D. Yang and C. M. Mak, "Relationships between indoor environmental quality and environmental factors in university classrooms," Build. Environ., vol. 186, no. August, p. 107331, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107331>

Derechos de Autor (c) 2022 Maria Teresa de la Cruz Chaidez, José Francisco Armendariz López, Francisco José Martín del Campo Saray, Miguel Isaac Sahagún Valenzuela, María Cristina Castañón Bautista, Carmen García Gómez



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](#)



# Virtualización de la enseñanza en Diseño: análisis de un ejercicio académico centrado en un juguete electrónico

## *Virtualization of teaching in design: analysis of an academic exercise focused on an electronic toy*

Alejandro Daniel Murga González 

Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universitario 1000, Tijuana, Baja California, México.

**Autor de correspondencia:** Alejandro Daniel Murga González, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universitario 1000, Tijuana, Baja California, México. E-mail: [alejandro.murga@uabc.edu.mx](mailto:alejandro.murga@uabc.edu.mx). ORCID: 0000-0002-5840-1822.

**Recibido:** 22 de Diciembre del 2022

**Aceptado:** 28 de Diciembre del 2022

**Publicado:** 31 de Diciembre del 2022

**Resumen.** – *El presente trabajo tiene como objetivo analizar desde un enfoque pedagógico la controversia de la virtualización de la enseñanza en las disciplinas proyectuales tomando como base un ejercicio académico desarrollado a partir del 2020, año del inicio de la pandemia por COVID-19; en el marco de varios cursos colegiados del programa educativo de Diseño Industrial de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería (FCITEC) perteneciente a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Para ello, se consideraron autores reconocidos en el campo de la pedagogía y su cruce con la disciplina del Diseño; así como la implementación de conceptos como interfaz, para dar una explicación esquemática del proceso interactivo de enseñanza y aprendizaje y la práctica docente.*

**Palabras clave:** Virtualización de la enseñanza; Taller de diseño; Interfaz; Proyecto de diseño; dispositivos electrónicos.

**Abstract.** – *The present work aims to analyze from a pedagogical approach the controversy of the virtualization of teaching in design disciplines based on an academic exercise developed from 2020, the year of the beginning of the COVID-19 pandemic; within the framework of several collegiate courses of the Industrial Design educational program, Faculty of Engineering Sciences (FCITEC) of the Autonomous University of Baja California (UABC). For this, recognized authors in the field of pedagogy and its crossover with the discipline of Design are considered; as well as the implementation of concepts such as interface, to give a schematic explanation of the interactive process of teaching and learning and teaching practice.*

**Keywords:** Virtualization in education; Design workshop; Interface; Design project; Electronic devices.



## 1. Introducción

El ejercicio académico resulta del cruce de varios cursos en el cual el autor participa como docente titular, incluyendo un taller de diseño, un curso de metodología de Diseño Centrado en el Usuario, un taller de prototipado electrónico y un curso teórico-práctico enfocado en pruebas de usabilidad, cursos llevados a cabo en diversos niveles de virtualización. En este sentido, el proyecto consiste en la elaboración de un juguete electrónico para infantes llamado Music House con el objetivo de asistir en el aprendizaje de colores y palabras mediado por la música, el cual está documentado en un artículo arbitrado [1]. Con ello se pretende (1) describir el modelo educativo de la UABC y el modelo de diseño instruccional como una estrategia didáctica normativa; (2) criticar el modelo de diseño instruccional y educación virtual desde aspectos pedagógicos situados en el Diseño, considerando los paradigmas disciplinares para su enseñanza presencial; y (3) analizar el caso de este ejercicio académico desde la noción de mediación e interfaz, como conceptos traducibles para ilustrar la importancia de la representación como un proceso metacognitivo para comprender conceptos complejos asociados al diseño de interacciones en el campo del diseño industrial, así como la reflexión sobre el caso de éxito de Music House en el marco de las restricciones por los riesgos de infección por COVID-19.

## 2. Discusión teórica

### 2.1. Modelo educativo de la UABC y el modelo de Diseño Instruccional

El modelo educativo de la UABC se sustenta en el humanismo, constructivismo y la educación a lo largo de la vida, con un enfoque en competencias o dominios de aprendizaje cognitivos, psicomotrices y afectivos; es decir, saber - conocimientos teóricos-, saber hacer - conocimientos prácticos- y saber ser -actitudes y valores-. El modelo constructivista la enseñanza

no es una simple transmisión de conocimientos, es en cambio la organización de métodos de apoyo que permitan a los alumnos construir su propio saber [2]. Es bajo esta premisa en la que se justifica el proyecto como medio de construcción del saber propio.

Para la implementación de dicho modelo, se exige en la UABC la conclusión de dos diplomados: uno de competencias docentes básicas y otro de competencias docentes para la educación a distancia (virtual). Adicional a ello, y ante la situación del proceso de virtualización por las condiciones sanitarias por COVID-19 se ha promovido como una estrategia de accesibilidad la estructura de la planeación didáctica basada en el esquema de diseño instruccional mediada por plataformas tecnológicas de e-Learning como Blackboard y Google Classroom, de tal suerte que se apliquen modelos como el del aula invertida, en el cual se incentiva la autonomía del estudiante para el manejo de recursos y reconociendo al docente como un facilitador de conocimientos.

Si bien se considera que la estrategia institucional sobre la virtualización de la enseñanza tiene un sentido social de permitir el acceso a mayor cantidad de alumnos y asimismo rebasando la barrera geográfica, esta política genera dudas sobre aspectos esenciales como la brecha digital, así como la exigencia paradigmática de la enseñanza presencial para disciplinas proyectuales como Diseño Industrial, que se han caracterizado en el uso del taller como una estrategia característica. Para ello, es de interés en este trabajo revisar la noción del concepto taller como una estrategia didáctica y como parte de las dinámicas propias de las disciplinas proyectuales.



## 2.2. Virtualización de la enseñanza en las disciplinas proyectuales ¿puede un taller de diseño ser virtual?

Autores señalan por un lado, señala la importancia de la disciplina entendida como práctica en la que se dominan técnicas [3] lo cual nos lleva a preguntar si es posible aprender, por ejemplo los principios y elementos del diseño meramente desde un dominio meramente cognitivo, en la que el alumno demuestre ese conocimiento a través de un examen escrito sobre qué es armonía, contraste, proporción, etc.; desde un ensayo escrito o inclusive desde el formato de curso autoadministrado, tal y como sucede con muchos cursos en línea en la que el papel del docente se reduce a la mínima expresión o inclusive es totalmente prescindible, o en contraste, si es necesario que la evidencia de aprendizaje esté relacionada con una exploración y experimentación de orden psicomotor para comprobar a través de la experiencia práctica y ejecución consciente, guiado por un docente.

Un ejemplo que surge en la tradición del campo de la arquitectura es el valor irremplazable del dibujo a mano alzada o la elaboración de modelos físicos, para comprender fundamentos básicos como la escala y la proporción, conceptos que no son posibles aprehenderlos en la utilización de los programas de dibujo asistido por computadora.

Autores en el área de diseño por otro lado, argumentan la superación del enfoque único de la planeación didáctica [4], en este caso, podría debatirse el empleo del diseño instruccional para cursos en línea como guía absoluta para el desarrollo de un curso. Proponen el enfoque de la enseñanza situada como rasgo propio de las prácticas de enseñanza, en las que se priorice la reflexión sobre las clases acontecidas o en su transcurso.

Teóricos de la pedagogía, acuñan la noción de andamiaje y la zona de desarrollo próximo [5] para constatar el rol del docente como un facilitador que

hace demostraciones y que está presente en la ejecución por parte de los alumnos para hacer observaciones. Asimismo, autores más contemporáneos señalan como parte fundamental de la experiencia didáctica el rol que juega la interacción y la situación [6].

En este sentido, se supera la noción de la instrucción como un elemento inamovible, y desde ahí se justifica el rol activo del docente, por lo cual al menos, las clases autoadministradas no son ideales desde los mencionados autores, y donde la instrucción puede ser ajustada en su proceso de ejecución.

Con lo mencionado, queda claro que una especie de enseñanza sincrónica es necesaria, más no queda del todo claro si esta enseñanza puede ser virtual o no. En ese sentido, el estudiante puede realizar tareas manuales en casa, fuera de las instalaciones de la universidad, pero el carácter social de dicho proceso desaparece. Sin embargo, el mismo estudiante puede traer el proyecto al aula y discutirlo, o inclusive presentarlo en una videoconferencia y tener retroalimentación en tiempo real. De esta forma “se entiende al taller como el lugar donde los estudiantes incorporan el habitus de la disciplina” [7].

Recurren a la noción de habitus y campo para referirse a la construcción de cosmovisión durante la enseñanza, vinculado a la expresión “colectivo de pensamiento” [8]. No es determinante, por tanto, si el espacio del taller puede ser entendido como exclusivamente presencial, o podría ser virtual o al menos híbrido. Se considera esta controversia entonces como punto de partida en el análisis del ejercicio académico a discutir en este trabajo.

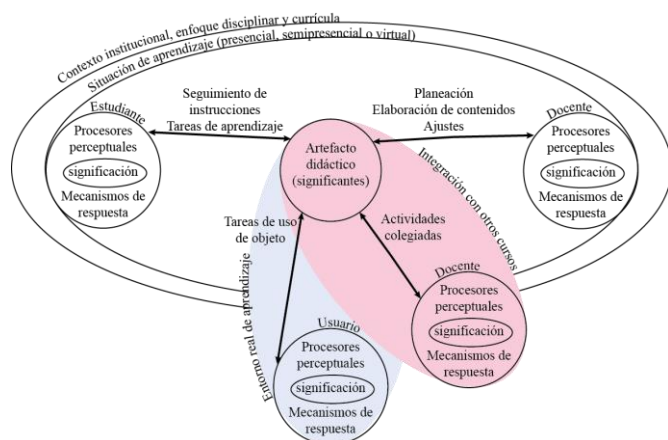
## 3. Propuesta de análisis: noción del concepto de interfaz como proceso metacognitivo, pedagógico y proyectual

El concepto de interfaz y affordance, teorizado



por [9-13] presentan un grado de traducibilidad en el área pedagógica si se toma la noción de mediación [14] la cual trata de una instancia entre dos partes, que permite realizar una comunicación vinculante e interactiva, como un flujo o canal de información. Esta acción implica una intencionalidad de parte de una de ellas, que realza, explota y da vida a una serie de conocimientos en torno al objetivo didáctico que se intenta mediar.

Autores del área de las tecnologías [15] hacen referencia a la revisión de los principios de diseño de interfaz, los cuales son coherentes con los principios de exploración, experimentación, retroalimentación, autonomía, experiencia, etc. que los autores en el ámbito de la pedagogía suponen esenciales. Es entonces el artefacto didáctico, inserto en una situación de aprendizaje, una especie de diseño de interfaz mediante la cual el docente y el alumno interactúan de forma inmersiva en procesos de significación y que en su diseño el docente puede tener mayor o menor conciencia (Figura 1).



**Figura 1.** Interacción, situación y significación: el proceso de enseñanza y aprendizaje como una interfaz vinculada al entorno real y a la colegiación.

Se puede comparar este esquema con el triángulo didáctico [16-17] en el cual son importantes las aristas, a los que se pueden denominar interacciones porque están mediados por una acción -aprender, enseñar, formar- concreta como

el seguimiento de instrucciones o tareas específicas de aprendizaje, en el caso del alumno; y en el caso del docente, los procesos de planeación, elaboración de contenidos y ajustes. Dichos procesos están enmarcados en estrategias de aprendizaje y docentes, respectivamente, que sin duda se viven de manera diversificada por procesos perceptuales y de significación, así como los mecanismos de respuesta individuales. En contraste con el triángulo, en esta propuesta se reinterpretan dos de los vértices -alumno y docente- como elementos inmersos en el tercer vértice, interpretado como un contexto abarcador -el currículo, enmarcado en la disciplina y en la institución-. Lo que queda al centro, no solo es la situación de aprendizaje, sino el artefacto didáctico mismo, que es diseñado por el docente, pero puesto en escena para mediar la interacción enseñanza y aprendizaje.

De esta manera, el artefacto didáctico puede ser intervenido tanto por el docente como por el alumno y en la exploración, experimentación y experiencia del artefacto, se construyen significados sobre la formación.

El docente, al reflexionar sobre los procesos de interacción y significación situados y representarlos inicia a comprender los esquemas de pensamiento y aprendizaje. Paralelamente, el concepto de interfaz aplicado en el campo de diseño sirve como un medio para que los estudiantes elaboren representaciones de la interacción humano-objeto, de tal forma que comprendan la importancia de principios y elementos del diseño en los aspectos comunicativos del objeto que permiten que una persona sepa cómo aprehender un objeto y usarlo. Un esquema que se ha implementado como estrategia didáctica en el diseño de dispositivos electrónicos es el modelo de arquitectura cognitiva [18] con el cual se pide a los estudiantes hacer su propia representación a partir del modelo según el proyecto de diseño elegido; de tal forma que





ponga en evidencia los aspectos relevantes a diseñar en los procesos interactivos.

Es así que “la representación gráfica es el instrumento de comprobación por el que decisiones concretas en el proceso de creación formal, adquiere o no sentido, en el interior del sistema” [19]. Cabe destacar que si bien en la práctica proyectual “el diseñador inventa el objeto en el acto mismo de representarlo; esto es, dibuja un objeto inexistente, cada vez con mayor precisión” [20] el proceso de comprobación no termina allí, sino que prevalece la exigencia de creación de la interfaz para ser comprobada en su uso.

A diferencia de disciplinas proyectuales donde el proyecto termina en una propuesta sin ejecución constructiva, o una representación que no puede ser usada para comprobar sus cualidades de diseño, en disciplinas como diseño industrial los estudiantes pueden terminar un taller de diseño con un producto funcional, lo cual se considera una ventaja, porque el proceso de comprobación de conocimientos excede la relación estudiante-docente para trasladarse a un entorno real, donde puede existir un usuario que tenga una opinión al respecto y que ayude a determinar en qué medida ese artefacto resuelve una problemática de diseño. Bajo ese principio se les enseña a los estudiantes a prototipar electrónicos, porque a través de la puesta en marcha del funcionamiento electrónico el alumno puede comprobar el sentido lógico de sus propuestas en distintas dimensiones en lo constructivo e interactivo.

Es entonces, que el dispositivo electrónico juega distintos roles: como parte de un proyecto estudiantil, como parte de un material didáctico y como objeto de uso para atender una necesidad concreta. Este objeto dispositivo tiene diversas significaciones según la perspectiva del estudiante, del docente o del usuario. Una variable adicional es el rol que juegan docentes de otros cursos que participan de manera colegiada para la elaboración de un proyecto integrador.

#### **4. Caso Music House como un ejercicio llevado a cabo en modalidad híbrida**

La intención de enseñar contenidos relacionados con la ergonomía cognitiva, programación y prototipado tecnológico en el programa educativo de Diseño Industrial tiene como base las exigencias de trabajo multidisciplinario en una zona industrial como la de Baja California, en la cual existen clusters que demandan a los diseñadores un conocimiento tecnológico para la toma de decisiones de diseño referentes a un producto electrónico, tal es el caso de la empresa Poly, que desde hace algunos años ha desarrollado el departamento de diseño para la elaboración de productos como diademas, audífonos, etc.

En este sentido, el cruce de saberes teóricos-tecnológicos permite comprender la relación entre actividades aparentemente distantes como el diseño de una carcasa, el diseño de las tareas o escenarios de uso y la programación de un dispositivo, mediados por conceptos complejos como percepción, cognición, interacción, affordance e interfaz. Es así que resulta de gran interés del autor trasladar conceptos que tienen una mayor tradición académica y aplicación profesional en campos como el diseño de software o diseño gráfico al ámbito del diseño de producto, precisamente para explorar en la mayor medida posible la noción de una interfaz diferente a las pantallas, a la que se denomina análoga.

Cabe señalar que en los cursos que participan en la elaboración de este proyecto académico se privilegia la investigación para diseñar mediante herramientas como el diseño de personas, análisis cognitivo de tareas, modelado de arquitectura cognitiva y entramado tecnológico, actividades que pueden ser desarrolladas de manera virtual. Para el diseño de personas [21-22] se considera que este estudio puede hacerse con bases de datos. En segunda instancia, el análisis de tareas, que



puede consistir en un storyboard, diagrama de flujo o secuencia de tareas, se puede delinear un guión que puede irse afinando conforme el proyecto va avanzando [23]. Para el entramado tecnológico, existen plataformas digitales como Tinkercad que permiten simular el prototipado de un electrónico mediante su construcción y programación de una manera totalmente virtual [24].

En este sentido, las exigencias de la presencialidad se dan en el uso de talleres de la facultad para la fabricación del prototipo, lo cual fue muy controlado durante las restricciones por medidas sanitarias, en las cuales tanto profesores como alumnos pedían permiso para asistir a la facultad y trabajar. Todo lo demás era mediado por la virtualidad: la plataforma de e-Learning Blackboard Ultra sirvió como una mediación tecnológica para las clases, asesorías, exposiciones de alumnos y entrega de proyectos. Inclusive, algunos ejercicios de exploración de la usabilidad del producto se mudaron en la mayor medida posible a la modalidad virtual, contemplando métodos mediados por videollamadas, por ejemplo.

## 5. Conclusiones

Para efectos de este trabajo es importante considerar el perfil de egreso específico del Diseñador Industrial de la UABC, que es desde donde surge este ejercicio académico. Se establece en el plan de estudios 2021-1 que el egresado “es un profesionalista con una formación sólida que aplica conocimientos de teoría y metodologías de diseño, procesos creativos, técnicas de representación, materiales y procesos de manufactura, fabricación artesanal, industrial y especializada, sustentabilidad e innovación, para solucionar problemáticas sociales y del mercado”. Dicha formación al parecer tiene implícita una exigencia presencial en el manejo de ciertas herramientas y materiales que sean observables en su desarrollo. Sin embargo, el aprendizaje de los procesos de manufactura y fabricación pueden

darse en momentos y espacios diferenciados. A diferencia de la arquitectura, donde el modelo, el plano y el render, son los entregables más importantes y se reestructuran por las devoluciones del docente; en Diseño Industrial el prototipo cobra mayor relevancia pues sirve para reflexionar y ajustar las mencionadas estrategias de representación; esto es porque juegan el rol de herramienta cognitiva para materializar un objeto que a medida en la que se prototipa confirma aprendizajes. El prototipo es en otras palabras, la representación material de la apropiación del conocimiento.

Por ello, se considera importante recordar los dominios de aprendizaje cognitivo, psicomotor y afectivo en los cuales se considera su presencia en todo momento del desarrollo del proyecto, solo que el dominio psicomotor, bajo los nuevos paradigmas de interacción mediadas por tecnologías de información y comunicación, puede tener momentos de ejecución presencial, virtual, híbrida, sincrónica y asincrónica. Es parte de la estrategia del docente en el diseño de la situación de aprendizaje pensar en cómo aprovechar las modalidades para impulsar competencias digitales y enriquecer el perfil de egreso de los diseñadores.

Conviene destacar que, en la actualidad, de los cursos mencionados, el único que se lleva de manera presencial es el Taller de Diseño, usando Blackboard Ultra como un repositorio de materiales y entrega de proyectos; el de prototipado de dispositivos se lleva de manera semipresencial; y tanto metodología de la investigación como el curso de evaluación de usabilidad se llevan en línea. Se incentiva en este caso que el mismo grupo de alumnos, llevando las distintas clases, elaboren un solo proyecto que pueda ser el medio para apropiarse los conocimientos sobre la metodología del Diseño Centrado en el Usuario, evaluación de usabilidad, prototipado



electrónico e integración de un prototipo funcional.

Finalmente, como consideraciones paradigmáticas de la enseñanza en diseño se tienen dos concepciones de la disciplina: una anglosajona enfocada en la enseñanza de un hacer; y una europea, enfocada en la enseñanza de un saber [7]. Con ello, se parte del supuesto de que en Latinoamérica ha sido más prolífera la tradición europea y que, por tanto, se privilegia desde este ejercicio académico la noción disciplinar versado más hacia la ciencia que hacia el oficio y de ese entendido los niveles de virtualización no suponen un obstáculo. Esta controversia queda aún por resolver en situaciones como las de Tijuana, donde todavía es preponderante la producción de la maquila y por tanto existen exigencias centradas en el hacer, y que por tanto es responsabilidad del núcleo académico del programa educativo quien determine la conveniencia de los enfoques según las competencias de cada curso y nivel de formación.

### Referencias

- [1] A. D. Murga González, G. R. Nájera Morga, and C. Caraveo Mena (2021, Dec). "Development of interactive gadgets: pedagogical, methodological and ergonomic aspects for industrial design," *Revista De Ciencias Tecnológicas* [On-line], vol. 4, no. 4. Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología de la UABC, pp. 412-424. <https://doi.org/10.37636/recit.v44412424>
- [2] J. P. Astolfi. "Vers une pédagogie constructiviste". *Se former*, 49, 1-36, 1995.
- [3] R. Kopytko (2007, May), "Philosophy and pragmatics: A language-game with Ludwig Wittgenstein," *Journal of Pragmatics* [On-line], vol. 39, no. 5. Elsevier BV, pp. 792-812, May 2007. <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2006.04.011>
- [4] E. Litwin (2022). "El oficio de enseñar: Condiciones y contextos" (1ª ed.) [On-line].

Buenos Aires: Paidós, 2008. Available: [https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=HLR4EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=El+oficio+de+ense%C3%B1ar+litwin&ots=g0yQG-moy\\_&sig=jcN\\_VeDs4kUVEdquiuCd8e\\_1ojk&redir\\_esc=y#v=onepage&q=El%20oficio%20de%20ense%C3%B1ar%20litwin&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=HLR4EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT4&dq=El+oficio+de+ense%C3%B1ar+litwin&ots=g0yQG-moy_&sig=jcN_VeDs4kUVEdquiuCd8e_1ojk&redir_esc=y#v=onepage&q=El%20oficio%20de%20ense%C3%B1ar%20litwin&f=false) [Dec. 1, 2022]

[5] E. V. Vielma, M.L. Salas. "Aportes de las teorías de Vygotsky, Piaget, Bandura y Bruner. Paralelismo en sus posiciones en relación con el desarrollo". *Educere*, 3(9), 30-37, 2000.

[6] C. Necuzzi. "Educación, enseñanza y didáctica en la contemporaneidad". *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, 67, 1-5, 2018. <https://doi.org/10.18682/cdc.vi67.1125>

[7] C. Mazzeo. "Diseño Gráfico en la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, un entramado de herencias y renovaciones". *Anales del IAA*. Volumen 43 (2), pp. 213-226, 2013.

[8] M. Pérez-Marín. "Ludwik Fleck: precursor del pensamiento de Thomas Kuhn". *Eidos*, (13), 130-149, 2010.

[9] J. J. Gibson. *The theory of affordances*. Hilldale, USA, 1(2), 67-82, 1977

[10] R. Meyer (2019, Oct.), "From Artefacts to Interfaces: Gui Bonsiepe and the Redefinition of Industrial Design" *Interface critique* [On-line]. p. Nr. 2 (2019): *Navigating the Human*, <https://doi.org/10.11588/IC.2019.2.66996>.

[11] D. A. Norman, "Design principles for human-computer interfaces," *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '83* [On-line]. ACM Press, 1983. <https://doi.org/10.1145/800045.801571>

[12] D. Norman, "Affordances and design". [On-line] Unpublished article, <http://www.jnd.org/dn.mss/affordances-and-design.html> [Dec. 1, 2022].



[13] D. A. Norman, "Natural user interfaces are not natural," *Interactions* [On-line], vol. 17, no. 3. Association for Computing Machinery (ACM), pp. 6-10, 2010. <https://doi.org/10.1145/1744161.1744163>

[14] J. Shotter. "Vygotsky: The social negotiation of semiotic mediation". *New Ideas in Psychology*, 11(1), 61-75, 1993. [https://doi.org/10.1016/0732-118X\(93\)90020-E](https://doi.org/10.1016/0732-118X(93)90020-E)

[15] J. Ruiz, E. Serral, and M. Snoeck, "Unifying Functional User Interface Design Principles," *International Journal of Human-Computer Interaction* [On-line], vol. 37, no. 1. Informa UK Limited, pp. 47-67, 2020. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1805876>

[16] Y. Chevallard, M. A. Joshua, "Un exemple d'analyse de la transposition didactique: la notion de distance". *Recherches en didactique des mathématiques*, 3, 1, 159-239, 1982.

[17] B. D'Amore, & M. Fandiño. "Un acercamiento analítico al" triángulo de la didáctica"". *Educación matemática*, 14(1), 48-61, 2002

[18] D. E. Kieras and D. E. Meyer, "An Overview of the EPIC Architecture for Cognition and Performance with Application to Human-Computer Interaction," *Human-*

*Computer Interaction* [On-line], vol. 12, no. 4. Informa UK Limited, pp. 391-438, 1997. [https://doi.org/10.1207/s15327051hci1204\\_4](https://doi.org/10.1207/s15327051hci1204_4)

[19] R. Moneo, M. Gandelsonas, O. Bohigas, P. Eisenman, H. Piñon, A. Wilder. "After Modern Architecture". *Arquitecturas BIS* (nº22) (1978) 2-32.

[20] A. Corona-Martinez. "Ensayo sobre el Proyecto. Buenos Aires" Editorial CP67, 1990.

[21] T. Miaskiewicz and K. A. Kozar, "Personas and user-centered design: How can personas benefit product design processes?" *Design Studies* [On-line], vol. 32, no. 5. Elsevier BV, pp. 417-430, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2011.03.003>

[22] C. Moser, V. Fuchsberger, K. Neureiter, W. Sellner, and M. Tscheligi, "Revisiting personas," *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* [On-line]. ACM, 2012. <https://doi.org/10.1145/2212776.2212822>

[23] P. W. Jordan. *An introduction to usability*. CRC Press, 2020 <https://doi.org/10.1201/9781003062769>

[24] J. F. Kelly. *3D modeling and printing with tinkercad: create and print your own 3D models*. Indianapolis, IN: Que Publishing, 2014.

Derechos de Autor (c) 2022 Alejandro Daniel Murga González



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](#)