


Método óptico para la alineación de espejos segmentados en el diseño de interiores. Optical method for the alignment of segmented mirrors in interior design

Astrid A. Cruz-Arredondo ^a, Anilu Franco-Arcega ^a, Karina Alemán-Ayala ^a, José L. González-Vidal ^a

Esteban Rueda-Soriano ^{a,*}

^aÁrea Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

La alineación de espejos segmentados es crucial en diversas aplicaciones ópticas; la implementación en el diseño arquitectónico ofrece nuevas posibilidades estéticas y funcionales. En este trabajo se emplea el interferómetro de Michelson para lograr una alineación óptima de espejos segmentados, corrigiendo la posición y orientación de cada segmento de espejo, garantizando una superficie reflectante continua y homogénea. Además, se presenta la integración del software AutoCAD para el diseño de los sistemas de soporte y alineación, así como el uso de impresión 3D para la fabricación de piezas personalizadas que aseguren una fijación precisa y estable de los espejos. Los resultados indican que la interferometría, combinada con herramientas de diseño asistido por computadora y fabricación de piezas de filamento plástico, no sólo mejora la precisión en la alineación de espejos, sino que también amplía las posibilidades creativas en el diseño interior y exterior, aportando tanto funcionalidad como estética.

Palabras Clave: Espejos segmentados, Interferometría, Alineación, Arquitectura.

Abstract

The alignment of segmented mirrors is crucial in various optical applications; its implementation in architectural design offers new aesthetic and functional possibilities. In this work, the Michelson interferometer is used to achieve optimal alignment of segmented mirrors, correcting the position and orientation of each mirror segment to ensure a continuous and homogeneous reflective surface. Additionally, the integration of AutoCAD software for the design support and alignment systems is presented, as well as the use of 3D printing for manufacturing customized pieces that ensure precise and stable fixation of the mirrors. The results indicate that interferometry, combined with computer-aided design tools and plastic filament part fabrication, not only improves accuracy in mirror alignment, but also expands creative possibilities in interior and exterior design, providing both functionality and aesthetics.

Keywords: Segmented mirrors, Interferometry, Alignment, Architecture.

1. Introducción

La innovación en el diseño arquitectónico busca constantemente nuevas formas de combinar funcionalidad y estética (Yi, 2021). En el diseño de interiores, se han ocupado las matemáticas como herramienta de innovación, por ejemplo en la creación de patrones para la decoración del espacio interior (Nottoli, 2024) (Deger & Değer, 2012); en las ciencias computacionales se han desarrollado algoritmos que ayudan a crear figuras simétricas que decoran muros (Chavey, 2013); otra de las tendencias en este campo es el uso de arreglo de espejos segmentados específicamente en el diseño de interiores (The Handbook of Interior Design, 2015). En el contexto del diseño arquitectónico de interiores, la colocación estratégica y la forma de los espejos segmentados pueden mejorar

significativamente el ambiente general y la funcionalidad de un espacio. Alrededor del mundo se encuentran arreglos de reflejos y grandes espejos en espacios arquitectónicos (Cherner, 2022; Crevillén, 2013; QRETARIA, 2023), como la Casa de Cristal de Philip Johnson (Schulze, 1996), el Salón de los espejos en el Palacio de Versalles (Berger, 2010) y el Hotel W Barcelona (Bofill, 2019).

De acuerdo a Livingston (2014) la forma en como la luz se distribuye en las superficies e interactúa en ellas, se percibe como luminosidad, y no sólo es la cantidad de luz que hay en una habitación, sino una combinación de intensidad de luz y las propiedades de reflexión, difusión, transmisión y absorción de las superficies de la habitación; es decir, cuando se integran cuidadosamente diversos elementos, como los espejos, pueden servir como decoración y/o herramientas prácticas

*Autor para la correspondencia: estebans@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: cr429552@uaeh.edu.mx (Astrid Ariana Cruz-Arredondo), afranco@uaeh.edu.mx (Anilu Franco-Arcega), karina_aleman@uaeh.edu.mx (Karina Alemán-Ayala), jlvidal@uaeh.edu.mx (José Luis González-Vidal), estebans@uaeh.edu.mx (Esteban Rueda-Soriano)

Historial del manuscrito: recibido el 10/06/2024, última versión-revisada recibida el 14/09/2024, aceptado el 17/09/2024, publicado el 14/11/2024. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13413>

(multiplican espacios, permiten selfies espontáneas y aportan arte y diseño (TecnoHotel News, 2022)) influyendo en la percepción de la profundidad, la luz y la organización espacial (Nikolić et al., 2021).

En la Figura 1 se ilustra el uso de espejos segmentados en espacios exteriores (Guardian Glass, 2017a), mientras que la Figura 2 muestra su aplicación en interiores (Guardian Glass, 2017b). En ambas figuras, se aprecia como los espejos distribuyen la luz de manera efectiva a través de sus reflejos, realzando tanto el entorno exterior como el interior. Cabe notar en la Figura 2, que en los espejos de lado lateral izquierdo se observa el reflejo de la escalera, sin embargo este no está alineado, por lo que se distorsiona la apreciación del espacio.



Figura 1 Edificio de la sede central del Grupo BNL-BNP Paribas
Imagen tomada de Roma se mira al espejo por Guardian Glass. *Diseño Interior Interiorismo Arquitectura y Diseño*, 296(1), 24, 2017

Los retos asociados al diseño de espejos segmentados en espacios interiores son variados y requieren un profundo conocimiento de las consideraciones estéticas y técnicas (Jukanović, 2018). Factores como la selección de materiales, y la precisión de la alineación de los segmentos deben abordarse meticulosamente para garantizar la perfecta integración de los espejos segmentados en el esquema general de diseño (Prieto, 2020).

Al colocar estratégicamente los espejos se puede optimizar el reflejo y la distribución de la luz natural, de este modo los diseñadores de interiores pueden reducir la dependencia de la iluminación artificial, con el consiguiente ahorro de energía, dando un enfoque más sostenible en el diseño arquitectónico (Cuttle, 2008), lo cual deja atrás la arquitectura clásica (Montjoy, 2024).

El entorno interior ofrece múltiples oportunidades para mejorar la calidad de vida de los ocupantes, aunque a menudo estas no son explotadas al máximo en la arquitectura moderna (McCoy, 2020).

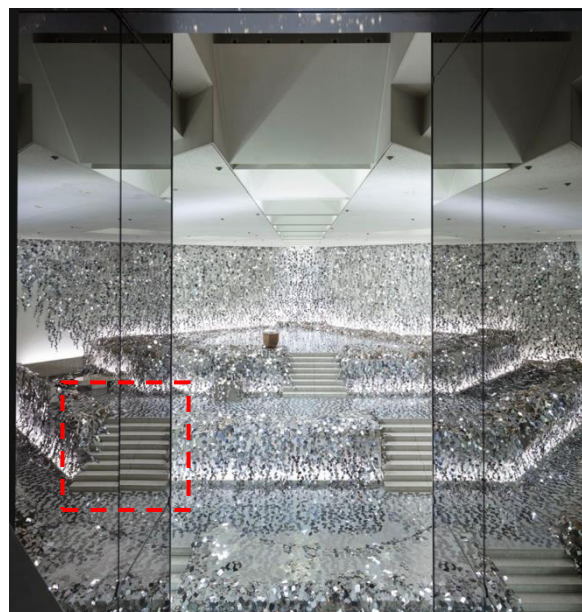


Figura 2 Entrada a la exposición "Cascada de Luz" en la escuela de Ikebana Sogetsu, en Tokio, Japón.
Imagen tomada de Cascada de luz por Kaleidoscopic Ivy/Nendo, *Diseño Interior Interiorismo Arquitectura y Diseño*, 296(1), 26-29, 2017

En el ámbito de la alineación de espejos segmentados de alta precisión, se ha optado por el uso de un método óptico basado en interferometría, en particular del interferómetro de Michelson (Yang et al., 2022; Born et al., 2020). Este instrumento está clasificado como un interferómetro de división de amplitud, dividiendo el haz de luz original en dos haces con menos amplitud. Estos haces se separan en trayectorias distintas: una se refleja en el espejo segmentado y otra que sigue a un segundo espejo. Cuando las dos trayectorias se combinan nuevamente, crean un patrón de interferencia que puede ser analizado para detectar desviaciones minúsculas en la posición y orientación de los segmentos del espejo (Harimoto & Toshima 2022; Malacara, 2015a). Este patrón de interferencia proporciona información detallada sobre las diferencias en la alineación, permitiendo realizar ajustes precisos para corregir cualquier desalineación y asegurar una superficie reflectante uniforme. La técnica permite corregir tanto la posición como la orientación de cada segmento de espejo, asegurando una superficie perfecta que maximiza las propiedades reflectantes y estéticas de la instalación.

La consideración principal del patrón de interferencia es tener su origen en la misma fuente y superponer los dos haces de luz en un punto en el espacio, dado que la diferencia de fase entre cada uno sea cercana a cero, tal y como se muestra en la siguiente ecuación (Hecht, 2016)

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1)$$

Donde:

- I = Irradiancia de la interferencia.
- I_1 = Irradiancia de la fuente de luz uno.
- I_2 = Irradiancia de la fuente de luz dos.
- δ = Diferencia de fase entre ondas.

La diferencia de fase que existe entre los dos haces de luz u ondas que se superponen es considerada como la Diferencia de

Camino Óptico (DCO), es decir, la diferencia en la distancia que recorre cada onda antes de que ocurra la interferencia.

La superposición de ondas y la DCO da como resultado el patrón de interferencia. En este trabajo se propone hacer uso del interferómetro de Michelson, como un instrumento que apoye la alineación de espejos segmentados.

El proceso para realizar este trabajo consistió en aprovechar espejos recuperados del desperdicio de otros para ser reutilizados y componer uno mayor mediante un arreglo de espejos, el uso se centra en la decoración y composición que puede aportar al arquitecto o diseñador de interiores mediante la distribución de la luz, para resaltar el diseño. El uso de la impresora 3D (Cui et al., 2022) ayuda a realizar las bases personalizadas para cada espejo, debido a que tienen formas irregulares. El método óptico del interferómetro, es la herramienta que permite tener una alineación adecuada. La evaluación cualitativa se obtiene analizando el patrón de interferencia que indica la proximidad de la alineación entre cada espejo. En las siguientes secciones se describe el método propuesto para desarrollar dicha alineación con el fin de contribuir en el diseño de interiores.

2. Método óptico

Para lograr que los espejos sean coplanares entre ellos mismos, es decir que la superficie de ellos estén alineadas, se hace uso del camino que recorre la luz dentro del interferómetro (D1 y D2), como se muestra el diagrama de la Figura 3. En dicha figura se observa el recorrido que hace la luz que va del láser (L) pasando por el expansor (Ex) y llegando al cubo divisor (CD) para dividir la luz en dos. Como se observa en el arreglo, se tienen dos espejos E1 y AE2, donde E1 será el de referencia, y AE2 será cada espejo a ser alineado dentro del arreglo. La distancia que existe entre el CD y E1 es D1 y deberá ser la misma o aproximadamente igual a D2, que se encuentra entre CD y AE2, debido a que la luz recorre cada camino y es reflejado por cada espejo, esta se vuelve a reunir en el CD para superponerse y crear el patrón de interferencia (Hariharan, 2007). La configuración a detalle del interferómetro se verá en la sección 3.4.

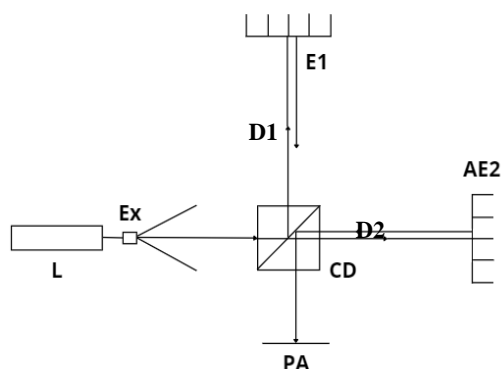


Figura 3. Diagrama de interferómetro con mecanismo de espejos. Fuente: Elaboración propia.

Una de las características de este interferómetro es la medición de la distancia entre espejos (E1, AE2), la cual se utiliza para realizar la alineación de cada uno de ellos. Es importante resaltar que se está evaluando la distancia de la superficie de cada espejo en el arreglo AE2 respecto a la

referencia E1, pero no se evalúa su forma, es decir, la forma de su perímetro.

3. Arreglo experimental

En esta sección se describe el procedimiento experimental llevado a cabo para alcanzar el objetivo del trabajo.

3.1 Materiales y limpieza

Se obtuvieron 6 espejos reciclados a partir de fragmentos de espejos rotos o desechados, todos ellos con un tamaño promedio no mayor de 5x4 cm. Estos espejos tienen formas irregulares, ya que la alineación de los espejos segmentados no se basa en su geometría. Esto permite crear diferentes formas artísticas que pueden servir como decoración de interiores (Saint-Gobain Glass, s. f.). Posteriormente, se liman los bordes de los espejos rotos para eliminar el filo, con ayuda de una franela y una solución 50/50 de alcohol isopropílico y agua, se limpian los espejos consiguiendo remover imperfecciones, como se muestra en la Figura 4.

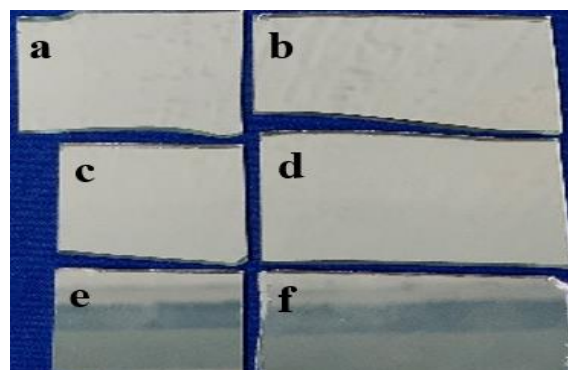


Figura 4. Espejos segmentados. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Diseño mecánico

Una vez listo los espejos, con el software AutoCAD 2021 se procede a diseñar las bases en las que se colocarán los espejos (Figura 5). Estas bases serán móviles para su alineación con el interferómetro de Michelson.

Se imprimieron las 6 placas con filamento de PLA (ácido poliláctico) como se muestra en la Figura 6, obteniendo las bases hechas a medida para cada espejo, como se observa en la Figura 7.

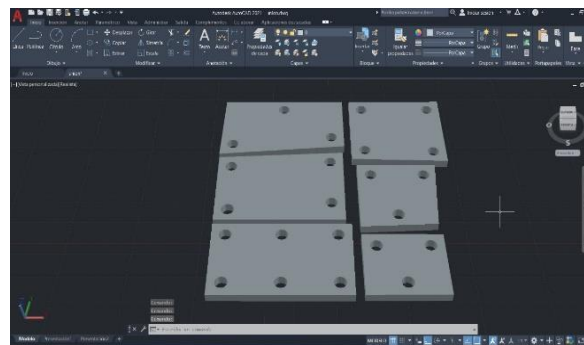


Figura 5. Bases a medida realizadas en el software AutoCAD. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Arreglo mecánico

Se utilizó una tabla de madera comprimida de 30cm x 40cm como soporte para colocar los espejos, cada uno con su base impresa correspondiente.

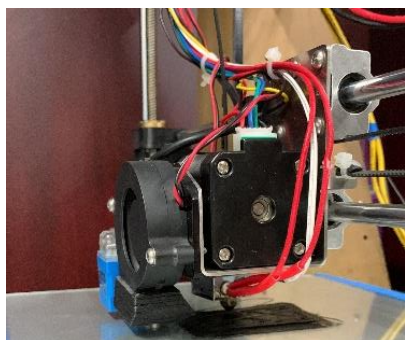


Figura 6. Impresora 3D para la impresión de las bases.
Fuente: Elaboración propia.

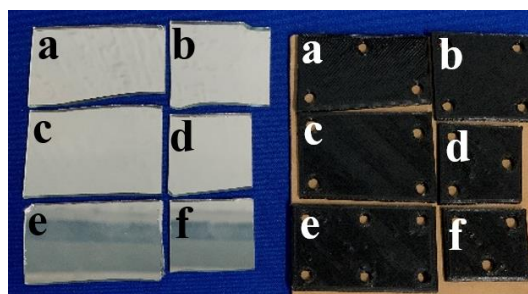


Figura 7. Espejos (izquierda) con su respectiva bases (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

Para permitir el movimiento de cada espejo se fija su parte posterior a la cabeza de cada tornillo mediante un adhesivo, el tornillo atraviesa la base y la placa de madera, colocando un resorte entre estas dos. Finalmente, se coloca una tuerca al final de cada tornillo, como se muestra en las Figuras 8 y 9

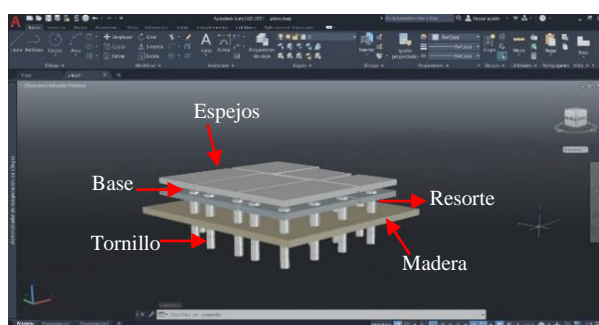


Figura 8. Prototipo en AutoCAD del arreglo mecánico.
Fuente: Elaboración propia.

3.4 Interferómetro de Michelson

El arreglo óptico consiste en un interferómetro de Michelson que se muestra en la Figura 3, con una fuente láser de He-Ne como luz puntual (L), con una longitud de onda de 632.8 nm. El haz de luz que sale del láser realiza un camino óptico a través de un expansor de luz láser (Ex) de 10X de aumento para obtener una fuente de luz extendida, llegando a un cubo divisor (CD), que divide el frente de amplitud en dos, el primero

dirigido al espejo 1 (E1) y el segundo al arreglo de espejos 2 (AE2), reflejándose cada uno y combinándose dentro del cubo divisor, para ser proyectado en la pantalla (PA) para poder observar el patrón de interferencia. La interferencia o patrón de interferencia se captura con una cámara profesional reflex Canon EOS Rebel T6s.

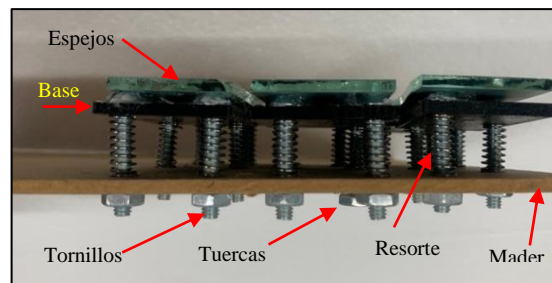


Figura 9. Arreglo final mecánico. Fuente: Elaboración propia.

3.5 Patrón de interferencia

Los patrones de interferencia se caracterizan por la alternancia de franjas brillantes y oscuras. Las brillantes corresponden a las zonas donde las ondas de luz interfieren constructivamente, es decir, sus amplitudes se suman. Las oscuras, por otro lado, corresponden a las zonas de interferencia destructiva, donde las amplitudes de las ondas se cancelan mutuamente.

El espaciado entre las franjas depende de la longitud de onda de la luz utilizada y de la diferencia de camino óptico ($D_2 - D_1$) entre las ondas que interfieren, como se puede apreciar en la Figura 10. Una diferencia de camino óptico más larga resultarán en un espaciado más estrecho entre ellas.

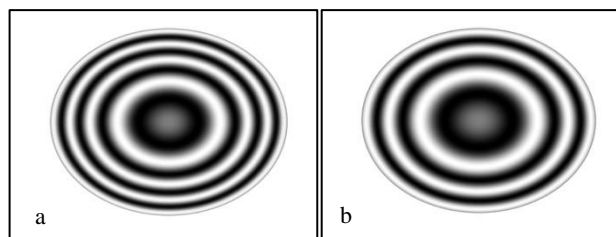


Figura 10. El patrón de interferencia de la izquierda tiene mayor DCO que el de la derecha. Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior, para lograr una óptima alineación, es esencial que los patrones de interferencia sean semejantes, asegurando que los caminos ópticos sean aproximadamente iguales o constantes entre cada espejo. La forma de las franjas dependerá de la planicidad de los espejos, que, debido a su ruptura o fabricación, puede presentar defectos, modificando la forma del patrón de interferencia de cada espejo, es decir, la forma de la superficie del espejo es independiente de la DCO que recorre la luz.

3.6 Proceso de Alineación de espejos

En la Figura 11 se observa el arreglo experimental utilizado para la alineación, E1 se toma como referencia, y se ajustan los caminos ópticos de cada uno de los espejos que conforman el arreglo AE2, el proceso consiste en alinear el espejo *a*, para continuar con su vecino *b*, siguiendo con *c* y así sucesivamente

(tal como se muestran ordenados en la Figura 4). Cada uno de los ajustes realizados se hace de forma manual con las tuercas de cada uno de los tornillos, esto para compensar las inclinaciones que cada uno de los espejos tiene.

La alineación en espejos segmentados se ha utilizado especialmente en el diseño y construcción de grandes telescopios reflectores (Michels et al., 2016), así como el estudio en la radioastronomía, y entre muchos otros más. (Astronomía, Instituto Geográfico Nacional s. f.).

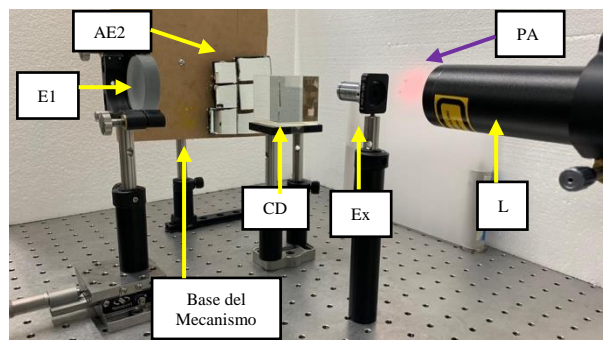


Figura 11. Arreglo de interferómetro con espejos. Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados

En la Figura 12 se muestra el arreglo de espejos antes de ser alineados, como se observa con las líneas de referencia añadidas. Cuando se coloca dicho arreglo en el interferómetro de Michelson, en la pantalla PA no se observan patrones de interferencia, pero conforme se van alineando los espejos, los patrones se hacen evidentes. Entre mejor sea la alineación, los anillos obtenidos en los patrones serán más grandes, como se observan en la Figuras 13 y 14, teniendo como referencia los espejos centrales c y d. Como se puede observar, las franjas de los patrones de interferencia son similares, tienen el mismo ancho y la misma distancia entre ellas; aunque no coinciden del todo como un patrón continuo entre espejos.

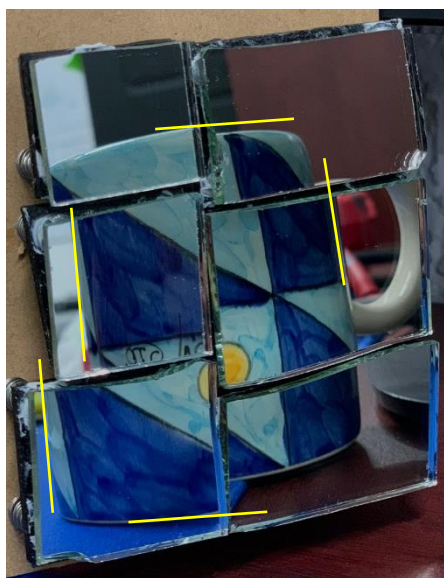


Figura 12. Espejos desalineados. Fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento es razonable dado que los espejos fueron obtenidos de material reciclado y no provienen del mismo lote de compra. Además, es importante recordar que la deformación observada en el patrón de interferencia se debe a la baja calidad de la superficie, ya que se trata de espejos de uso doméstico.

En la Figura 15 se puede observar el reflejo del arreglo de espejos alineados, el cual es perfecto y suficiente para el uso decorativo que se quiere realizar, recordando que, el ojo humano como sistema óptico, tiene sus limitaciones debido a las aberraciones y tamaño finito de la retina (Malacara, 2015b).

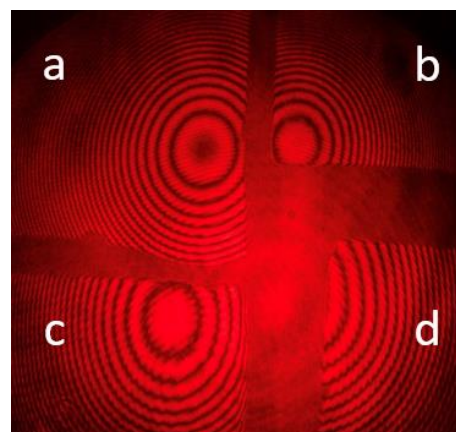


Figura 13. Patrones de interferencia de los espejos a, b, c, d. Fuente: Elaboración propia.

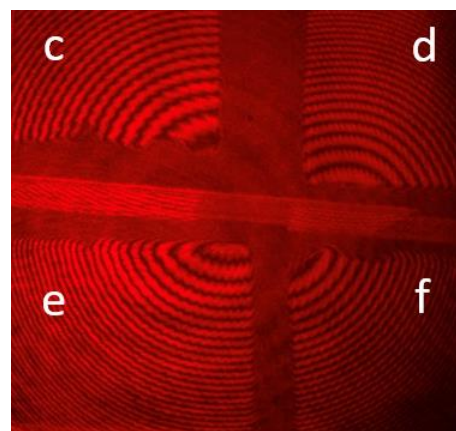


Figura 14. Patrones de interferencia de los espejos c, d, e, f. Fuente: Elaboración propia.



Figura 15. Espejos alineados. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El interferómetro de Michelson es una técnica versátil, ampliamente utilizada, capaz de alinear un arreglo de espejos con una alta calidad óptica para el ojo humano. Los resultados demuestran que es posible lograr un reflejo continuo y uniforme, lo que confirma la viabilidad del proceso. Uno de los mayores desafíos fue el ajuste manual, ya que cualquier movimiento en los tornillos podía desalinear tanto el espejo en cuestión como sus vecinos. Por ello, fue necesario aplicar un cuidado extremo durante la alineación. Además, los resultados muestran que la forma irregular del corte del espejo o las impurezas inherentes a su reciclaje no afectan el resultado final. Esto permite generar reflejos estéticamente agradables, que pueden ser utilizados con fines decorativos en el diseño arquitectónico contemporáneo.

La alineación exitosa de los espejos segmentados abre la posibilidad de explorar configuraciones más sofisticadas, añadiendo un valor estético al entorno. Esto permitirá profundizar en el potencial de estas superficies mediante la manipulación de los reflejos, su impacto en la percepción de los espacios interiores, y su capacidad para contribuir al ahorro de energía mediante una distribución eficiente de la luz tanto en interiores como en exteriores. Además, se prevé la integración de tecnologías de impresión 3D con distintos tipos de filamentos para producir soportes personalizados, que ofrecerán mayor flexibilidad en el diseño y la instalación dentro de una amplia gama de contextos arquitectónicos.

Referencias

Astronomía, Instituto Geográfico Nacional (s. f.). Astronomía: Interferometría de muy larga base. Recuperado 19 de marzo de 2024 de <https://astronomia.ign.es/oan/interferometria-de-muy-larga-base#:~:text=La%20Interferometr%C3%ADa%20de%20Muy%20Larga, objeto%20que%20se%20quiere%20estudiar>

Bofill, R. (2019). Ricardo Bofill: Visions of Architecture. Gestalten.

Livingston, J. (2021). Designing with light: The art, science, and practice of architectural lighting design (2nd ed.). Wiley.

TecnoHotel News. (2022, febrero 8). El espejo como tendencia en diseño de interior. <https://tecnohotelnews.com/2022/02/espejo-tendencia-diseno-interior/>

Berger, R. W. (2010). Palace of the Sun: The Louvre of Louis XIV. Penn State Press.

Born, M., Wolf, E., Bhatia, A. B., Clemmow, P. C., Gabor, D., Stokes, A. R., ... Wilcock, W. L. (2020). Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light 60th Anniversary Edition (7th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

Chavey, D. (2013, January 1). Wallpaper designs of mirror curves inspired by african sona. , 2013, 345-352. <http://archive.bridgesmathart.org/2013/bridges2013-345.pdf>

Cherner, J. (2022, Enero 26). Edificios con arquitectura reflectante: Espejos en la ciudad. Architectural Digest España. <https://www.revistaad.es/arquitectura/galerias/edificios-arquitectura-reflectante>

Cuttler, C. (2008). Lighting by design (2nd ed.). Architectural Press.

Cui, J., Ren, L., Mai, J., Zheng, P., & Zhang, L. (2022). 3D printing in the context of cloud manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 74, 102256. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102256>

Crevillén, C. (2013, Agosto 14). La arquitectura invisible: El efecto espejo. Carmen Crevillén. <https://carmencrevillen.com/blogs/la-arquitectura-invisible-el-efecto-espejo>

Deger, K O., & Değer, A H. (2012, January 1). An application of mathematical tessellation method in interior designing. , 51, 249-256. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812032922>

Guardian Glass (2017a), Roma se mira al espejo. *Diseño Interior Interiorismo Arquitectura y Diseño*, 296(1), 24

Guardian Glass (2017b), Roma se mira al espejo. *Diseño Interior Interiorismo Arquitectura y Diseño*, 296(1), 24

Hariharan P. (2007). Basics of interferometry (2nd ed.). Elsevier Academic Press

Hecht, E. (2016). Optics. (5th ed.). Pearson Education.

Jukanović, A. (2018). Architectural lighting design: A practical guide. The Crowood Press.

Malacara (2015a). El ojo humano, Fondo de Cultura Económica. *Óptica básica* (3ra ed). (pp. 163-204)

Malacara (2015b). Interferencia e interferómetros, Fondo de Cultura Económica, *Óptica básica*. (3ra ed). (pp. 235-273)

Michels, G J., Genberg, V L., & Bisson, G. (2016, August 9). Improvements in analysis techniques for segmented mirror arrays. SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2231436>

Mitchel McCoy, J. (2020). The indoor environment: opportunities available, opportunities missed. *Legado De Arquitectura Y Diseño*, 2(2), 18-30. Consultado de <https://legadodearquitecturaydiseno.uaemex.mx/article/view/13721>

Montjoy, V. (2024, marzo 7). Espejos de gran tamaño en arquitectura: la ilusión de espacios más grandes y luminosos. ArchDaily México. <https://www.archdaily.mx/mx/993331/espejos-de-gran-tamano-en-arquitectura-la-ilusion-de-espacios-mas-grandes-y-luminosos>

Nikolić, O., Mitković, P., Živković, S., & Tamburić, J. (2021). Hovering Architecture and Using Mirrors in Architectural Design. *Tehnički vjesnik*, 28(3), 1067-1073.

Nottoli, H. S. (2024). Una herramienta para el diseño y dos ejemplos urbanísticos. *Arquitecto*, (23). <https://doi.org/10.30972/arq.237660>

Prieto N. (2020). El espejo como material de construcción. Últimos proyectos en Tectónica. De <https://tectonica.archi/articles/espejo-provisional/>

QRETARIA. (2023, Mayo 15). Arquitectura reflectante: Una nueva estética. <https://propertyjournal.com.mx/arquitectura-reflectante-una-nueva-estetica/>

Saint-Gobain Glass. (s. f.). Super Stylish Ways to Introduce Mirrors into Your Home. <https://in.saint-gobain-glass.com/blog/super-stylish-ways-introduce-mirrors-your-home>

Schulze, F. (1996). Philip Johnson: life and work. University of Chicago Press.

T. Harimoto and K. Toshima, "A Michelson Twin Interferometer for Phase-shifting Measurement," in Proceedings of the 2022 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory (ISOM) and the 13th International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication (ODF), Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2022), paper P_OTh_26.

The Handbook of Interior Design. (2015, February 13). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118532409>

Yang, L., Dong, Y., Yang, Z., & Liu, Z. (2022, April 11). Co-phase state detection for segmented mirrors by dual-wavelength optical vortex phase-shifting interferometry. *Optica Publishing Group*, 30(9), 14088-14088. <https://doi.org/10.1364/oe.455890>

Yi, Y. (2021, January 1). Research on mirror materials in interior and landscape. , 546-550. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210407.107>