

Capítulo 9

Concentradores solares luminiscentes. Prospectiva en el sector energético a corto, mediano y largo plazo

Víctor Hugo Romero Arellano¹

hugo.romero@academicos.udg.mx

José Miguel Blancas Flores¹

jose.blancas@academicos.udg.mx

Mackenson Polché¹

polchemackenson@yahoo.com.mx

Belkis Sulbarán Rangel¹

Belkis.sulbaran@academicos.udg.mx

Carlos Alberto Guzmán González¹

alberto.guzman@academicos.udg.mx

<https://doi.org/10.61728/AE20252038>



¹ Centro Universitario de Tonalá. Universidad de Guadalajara

Resumen

El crecimiento horizontal de las grandes ciudades, ha provocado enormes distancias de traslado, lo que representa una inversión de tiempo tanto para los pobladores, como para la industria y el comercio. Actualmente, muchas ciudades están optando por un crecimiento vertical, esto ha provocado un aumento en la densidad poblacional y a su vez una gran demanda energética. Para atender esta demanda de energía de forma sustentable, se ha optado principalmente por el aprovechamiento de energía solar a través de paneles fotovoltaicos, sin embargo, recientemente ha llamado la atención otro tipo de sistemas entre ellos los Concentradores Solares Luminiscentes (CSL), que a diferencia de los paneles solares, prometen una mayor estética, ya que estos pueden ser diseñados como ventanales en fachadas, y a su vez tener una eficiencia de conversión viable para considerar a los CSL como una tecnología con gran potencial en el aprovechamiento de energía renovable. En este documento se discute Las perspectivas de esta tecnología, así como las dificultades que se tienen que resolver para consolidar a los CSL.

Introducción

Debido a la expansión demográfica, así como el creciente aumento de la tecnología de dispositivos electrónicos, la demanda energética a nivel mundial presenta una tasa de crecimiento acelerada. Para cubrir esta demanda energética, distintos países están migrando a la generación de energía sustentable, como la energía solar, energía eólica, entre otras (Enerdata, 2024), (Arias, 2022).

En fechas recientes, se ha ido popularizando la instalación de paneles solares en casa habitación; aunque depende mucho de la ubicación geográfica, estos paneles solares pueden cubrir la demanda energética de una casa habitación tradicional ocupada por una familia, donde la instalación de los paneles solares suele ocupar el área de la azotea. Sin

embargo, para una edificación vertical (edificios), la azotea puede ser un espacio insuficiente para la instalación necesaria de paneles que cubran el total de la demanda energética del edificio (ver Figura. 1a).

En un contexto global de transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles, los Concentradores Solares Luminiscentes (CSL) han emergido como una tecnología prometedora para aprovechar la energía solar de manera más eficiente y versátil. Estos dispositivos consisten en ventanas de vidrio a las que se les añade materiales luminiscentes, típicamente mediante la adhesión de una película compuesta. Al momento en que la hoja de vidrio recolecta la luz solar o ambiental, las partículas luminiscentes absorberán una parte de la región solar, seguido de la emisión de fotones a longitudes de onda más largas. Estos fotones son confinados dentro del panel a través de reflexiones internas y guiados hacia los bordes, donde se ubican las celdas solares convencionales (ver Figura 1b). La ventaja principal de los CSL es que pueden concentrar la luz solar en un área pequeña, reduciendo la cantidad de material fotovoltaico necesario y, a su vez, pueden transmitir la porción de luz que no ha sido aprovechada para iluminar la habitación con luz natural, tal como lo haría una ventana tradicional (Richards, 2023). Este enfoque puede integrarse de manera ideal en elementos arquitectónicos como ventanas y fachadas de edificios, lo que tiene implicaciones directas para el creciente sector de la construcción de edificios a nivel mundial y la expansión de la industria del vidrio plano para ventanas.

Además, los CSL pueden funcionar incluso en condiciones de baja luminosidad, como días nublados o en áreas urbanas con sombras, lo que les da una ventaja sobre los paneles solares tradicionales. Estas propiedades los hacen especialmente atractivos para aplicaciones arquitectónicas, donde la integración de tecnologías solares no invasivas es una prioridad.

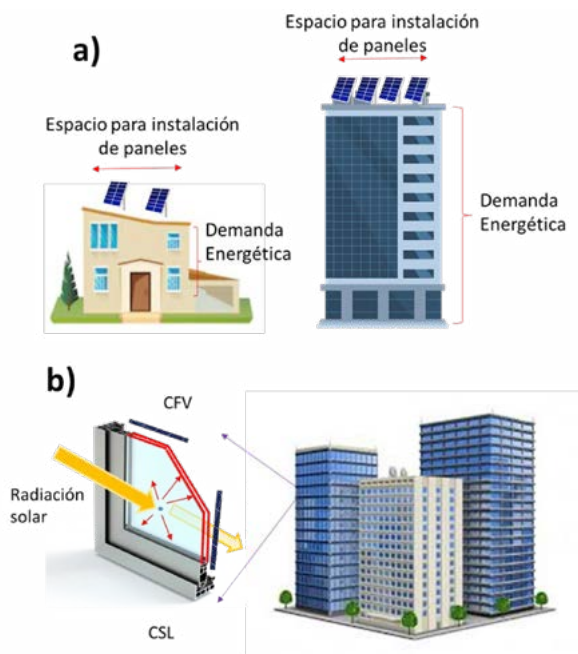


Figura 1. a) Relación de la demanda energética y espacio disponible para instalación de paneles solares. b) Concepto de un Concentrador Solar Luminiscente

Antecedentes

La industria de la construcción está experimentando un cambio significativo hacia la sostenibilidad, impulsado por regulaciones más estrictas, incentivos para la eficiencia energética y la demanda de los consumidores por edificios más verdes y autosuficientes. Los CSL pueden desempeñar un papel crucial en este escenario, permitiendo que los edificios generen su propia energía de manera eficiente al mismo tiempo que mantienen su estética. Integrados en ventanas, fachadas o incluso techos, los CSL permiten a los edificios no solo recolectar energía, sino también reducir el consumo de electricidad al aprovechar la luz natural de manera más eficiente (Richards, 2023).

En mercados emergentes y países en desarrollo, donde el crecimiento de la construcción es más rápido, los CSL podrían ofrecer una solución

accesible para promover la energía renovable. En áreas urbanas densamente pobladas, los CSL en ventanas permiten aprovechar la luz solar sin ocupar espacio adicional, una ventaja significativa en comparación con los paneles solares tradicionales que requieren superficies de techo o largas extensiones de terreno.

A medida que la industria de la construcción se mueve hacia el diseño de edificios de energía neta cero, donde el balance energético anual es neutral, los CSL tienen el potencial de ser una tecnología clave. Esto es particularmente relevante dado que las ventanas y las fachadas de vidrio son cada vez más comunes en los edificios modernos, y los CSL pueden integrarse de manera no invasiva en estos diseños arquitectónicos.

El crecimiento de la industria del vidrio plano está estrechamente vinculado al auge de la construcción de edificios, especialmente en sectores comerciales y residenciales de gran altura. Según varios informes de mercado, la demanda mundial de vidrio plano está en auge debido al aumento de la urbanización, el crecimiento demográfico y la necesidad de infraestructuras más eficientes en términos energéticos (Savaète, 2021). En este contexto, la integración de los CSL en las ventanas ofrece una oportunidad significativa para que la industria del vidrio agregue valor a sus productos. Al permitir que las ventanas actúen como colectores solares mientras conservan sus propiedades ópticas, los CSL no solo mejoran la eficiencia energética de los edificios, sino que también mantienen la transparencia y estética deseada por arquitectos y diseñadores. Esta capacidad de integración en ventanas y fachadas de vidrio puede aumentar aún más la demanda de productos de vidrio especializados, lo que impulsa la innovación en la industria del vidrio plano.

A pesar de las promesas que ofrecen los CSL, aún existen desafíos tecnológicos y económicos que deben abordarse para una adopción masiva. La eficiencia de conversión de energía de los CSL sigue siendo inferior a la de los paneles solares tradicionales, aunque la integración en ventanas y fachadas proporciona beneficios adicionales en cuanto a diseño y funcionalidad. A largo plazo, la investigación en materiales luminiscentes, el desarrollo de procesos de fabricación más rentables y la mejora de la durabilidad de los CSL son áreas críticas para la evolución de esta tecnología (Richards, 2023) (Debije, 2012).

Metodología

Las investigaciones en torno a los CSL han permitido un gran avance de esta tecnología, sin embargo, aún sigue siendo considerada una tecnología emergente, por lo cual, la prospectiva no puede medirse en términos de datos comerciales. Con el fin de cuantificar el crecimiento de esta tecnología, se presenta un análisis estadístico de publicaciones científicas sobre CSL, donde la fuente de información, se tomó el motor de búsqueda “Google Scholar”. Posteriormente, se realiza una correlación con la proyección de crecimiento de la industria de la construcción y el mercado del vidrio plano.

Tendencia de crecimiento de investigaciones sobre CSL

Entre las distintas publicaciones científicas referentes a los concentradores solares luminiscentes, podríamos englobarlas en 3 temáticas principales; i) exploración de materiales, ii) diseños o configuraciones, y iii) modelado matemático. La primera de ellas (exploración de materiales), está centrada en distintos materiales luminiscentes, pero también se discute la matriz que los soporta, siendo predominantes matrices poliméricas entre ellas Acetato de polivinilo (PVA), Polivinilpirrolidona (PVP), Polidimetilsiloxano (PDMS), Polimetilmetacrilato (PMMA) entre otras, todas ellas destacan su alta transmitancia de la región del espectro solar (Griffini, 2019), mientras que los materiales luminiscentes más reportados están centrados en luminóforos, tintas orgánicas, nanocristales dopados con tierras raras, y puntos cuánticos (Moraitis, 2018). En cuanto a la segunda temática (Diseños y Configuraciones), está centrada principalmente en el arreglo o distribución de los materiales que componen el sistema, como por ejemplo de capa o película simple, o configuraciones de doble o múltiple película entre otro tipo de configuraciones (Rafiee, 2019). La tercera temática (modelado), centrada en los modelos matemáticos que describen los fenómenos físicos de acuerdo a cada configuración (Kaysir, 2016), pero también destacan los modelos predictivos, como por ejemplo Ferreira et al. (Ferreira, 2024), quien utiliza algoritmos de aprendizaje automático, para predecir eficiencias de los procesos ópticos, así como

(André, 2024) o P.S. André, quien hace su parte mediante redes neuronales artificiales. Para englobar todas las temáticas antes señaladas, se utilizó como palabras clave de búsqueda el texto: “Luminiscent Solar Concentrator”, El periodo de revisión reportado en este documento es del año 2000 a noviembre del 2024. En la Figura 2. Se muestra el valor arrojado por el buscador, cabe mencionar que dicho valor no necesariamente corresponde a número de publicaciones, sino al número de coincidencias al criterio de búsqueda, sin embargo, refleja el crecimiento de interés de este tipo de tecnología.

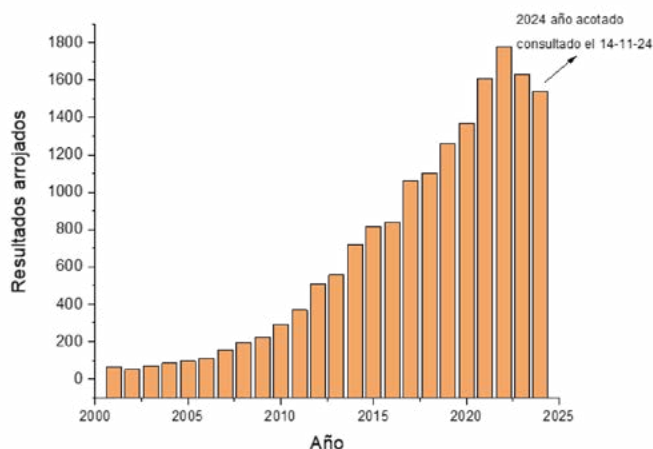


Figura 2. Coincidencias al criterio de búsqueda del texto: “Luminiscent Solar Concentrator” en “Google Scholar”, consultado el 14-de noviembre del 2024

Tal como se puede apreciar la Figura 2, a partir del año inicial de la estadística (2000) y durante los primeros 6 años, el número de resultados arrojados es inferior a 100 teniendo un crecimiento muy lento o casi nulo, esto se debe a las bajas eficiencias de los materiales luminiscentes que prevalecía en esas fechas, lo cual no eran muy esperanzadoras, sin embargo con la consolidación de diversos nanomateriales luminiscentes, entre ellos los puntos cuánticos contribuyeron a la mejora de estos sistemas y por lo tanto el número de publicaciones aumentó considerablemente, tal como se puede apreciar que a partir del año alrededor del 2010 el

número de coincidencias arrojadas fue de 292 y para el año 2022 alcanza el valor arrojado de 1780, es decir un incremento alrededor del 600%, lo que corrobora el interés de estos sistemas como un dispositivo con gran potencial para el aprovechamiento de energía renovables.

Tendencia de crecimiento de la industria de la construcción

Por naturaleza, los seres humanos tendemos a agruparnos, cohabitar y transformar espacios para satisfacer nuestras necesidades como la alimentación, vivienda, salud, entretenimiento, etc. Este esquema de sociedad ha dado origen a las grandes ciudades donde se concentra la mayor parte de la actividad económica. Hace algunas décadas, el crecimiento de la población demandó espacios nuevos que fueron satisfechos con el crecimiento horizontal de las ciudades; sin embargo, esto trajo algunas consecuencias debido a las largas distancias que se generaron con la extensión de las ciudades, por lo cual actualmente el alza de la tasa de crecimiento de la población ha provocado que ahora la expansión de las ciudades sea de forma vertical, es decir, la construcción de casas donde habita solo una familia ha dejado de ser atractiva para dar paso a la construcción de edificios que albergan a decenas o cientos de familias, así como oficinas y comercios.

Algunos datos estadísticos del sector de la construcción se presentan en la tabla. 1. Una gran cantidad de países presentan una tendencia de crecimiento del sector de la construcción; esto se refleja con un valor pronosticado para el 2024 de 3.5 % de crecimiento para el sector de la construcción en general, aunque esto incluye obra civil, edificación, trabajos especializados, entre otros. En la misma tabla se puede apreciar que para el subsector residencial se sigue la misma tendencia de crecimiento con un valor de 4.8 % y edificación no residencial (oficinas, comercio, etc.) de 3.7 %. Por otra parte, en México la tendencia también ha mantenido un crecimiento en los últimos años. Y para este año 2024, fue pronosticado un crecimiento de 4.1 % en el subsector de la edificación. (Atradius, 2023), (Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, 2024).

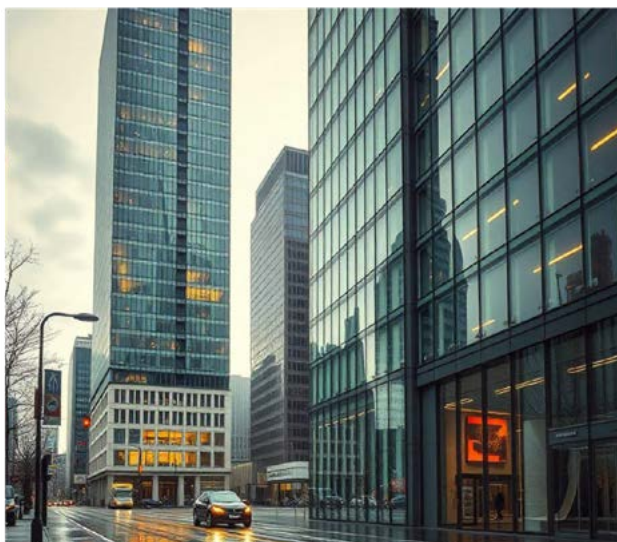
Tabla 1. Pronóstico de crecimiento del sector de la construcción.

Sector de la construcción a nivel mundial	Crecimiento pronosticado para el 2024
Construcción en general	3.5 %
Subsector residencial	4.8 %
subsector no residencial	3.7 %
Subsector Edificación en México	4.10 %

Estas tendencias de la industria de la construcción corroboran el crecimiento vertical, principalmente en las grandes ciudades, que a su vez representa un potencial para la instalación de CSL.

Tendencia de crecimiento de la industria del vidrio plano

Tal como se discutió en la sección anterior, a nivel mundial, en las grandes ciudades existe una tendencia de crecimiento vertical. En la arquitectura moderna de los edificios sobresalen las fachadas de vidrio (ventanales) en una gran variedad de estructuras (ver Figura 3). De esta manera, a la par del crecimiento de la industria de la construcción, también existe una tendencia favorable en la industria del vidrio plano.

**Figura 3.** Edificio con fachada de vidrio, arquitectura predominante en grandes edificios

La industria del vidrio abarca el vidrio recocido, vidrio reflectante, vidrio revestido, etc., que cubre la demanda de espejos, botellas, vidrio automotriz, vidrio para paneles solares, pantallas de dispositivos electrónicos y vidrio plano para ventanas, entre otras aplicaciones. En el caso del sector del vidrio plano, se estima que el mercado mundial en el 2024 es de 114 347 millones de dólares con una proyección a los 14 676 millones de dólares para el 2029, es decir, una tasa de crecimiento anual de 5.28 %. (Intelligence, 2024), mientras que para México la estimación de crecimiento es de 4.92 %.

El crecimiento del subsector de la construcción de edificios (habitacional y no habitacional) provoca la misma tendencia para la industria del vidrio plano, pues ambos sectores están correlacionados; a su vez, estos valores dan una idea de la cantidad de metros cuadrados que podrían ser espacios para albergar la instalación de CSL. El aprovechamiento de estos espacios, sin duda alguna, colocaría a los CSL como una de las tecnologías que podrían predominar en el mercado del aprovechamiento de energías renovables.

Demanda energética de los edificios

El consumo o demanda energética de los edificios es muy dependiente de la ubicación geográfica, ya que, mientras en las regiones heladas los edificios tendrán una mayor demanda por los sistemas de calefacción, y de manera contraria, las regiones cálidas necesitarán sistemas de enfriamiento (aires acondicionados), en contraste con las regiones de clima templado, donde estos sistemas de aclimatación son de uso reducido.

Se estima que el 34 % de la demanda energética mundial es del 37 % (UNEP, 2024). Estos valores no han pasado desapercibidos; en el 2015, en la Asamblea General de las Naciones Unidas, se establecieron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con el propósito de lograr un futuro más sostenible. Entre estos objetivos, el número 7 es denominado “Energía asequible y no contaminante”. Bajo esta visión, muchos países han implementado políticas públicas, como incentivos fiscales a edificios sustentables o coinversión para la instalación de sistemas de energía verde (UNEP, 2024). Por su parte, en México existen las Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética (NOM-ENER), que defi-

nen especificaciones técnicas para garantizar un uso más eficiente de la energía, entre ellas la NOM-020-ENER-2011, que habla de las eficiencias energéticas en edificaciones habitacionales, y LA NOM-008-ENER-2001 para edificios no residenciales (México, 2024).

Las acciones tomadas por el sector constructor para disminuir el consumo eléctrico van desde pinturas aislantes de calor, ventanas polarizadas o atenuadas (entintadas) para regular la transmisión de radiación que se recibe del ambiente; en cuanto al aprovechamiento de energía renovable, predominan los calentadores de agua solar y paneles fotovoltaicos. En los próximos años, la implementación de concentradores solares luminiscentes como sistemas de aprovechamiento de energía solar en edificios podría contribuir de manera significativa a la sustentabilidad prevista por las políticas públicas que se han ido sumando en la industria de la construcción.

Retos de los concentradores solares para los próximos años

Como toda tecnología emergente, insertarse en el mercado implica grandes retos; en el caso de los concentradores solares luminiscentes, estos retos van desde lo técnico hasta lo económico. La lista de dificultades puede ser muy amplia, pero para no extender la discusión, a continuación se mencionan las de mayor consideración.

Actualmente, la principal dificultad técnica, que aún no ha quedado resuelta por completo, es el problema del escalamiento de los sistemas CSL. Muchos de los materiales luminiscentes utilizados en los CSL presentan el fenómeno de reabsorción (ver Figura 4a). Esto significa que una parte del espectro de absorción se superpone con el espectro de emisión. De esta manera, al momento en que el material sea excitado por la radiación de luz, ocurrirá un proceso de emisión; sin embargo, entre mayor sea la dimensión de la hoja de vidrio (ventana), menos probabilidad habrá para que dicha emisión llegue hasta la orilla, ya que en su trayecto encontrará otras partículas luminiscentes que reabsorberían parte de la emisión. (Figura 4b) (Ten Kate, 2014). Además, debido a que la parte de luz de interés viaja a través de la hoja de vidrio por el fenómeno de reflexión interna total, por lo que, de igual manera, conforme las

dimensiones del sistema son mayores, es más probable que una porción de luz escape del sistema.

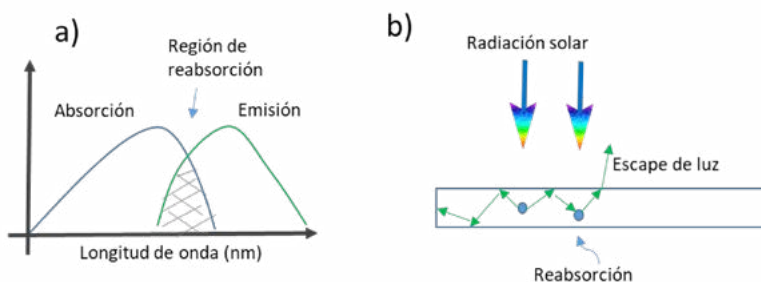


Figura 4. a) Curvas de absorción y emisión que se superponen en una región del espectro electromagnético, b) hoja de vidrio (vista transversal), donde se muestra partículas luminiscentes siendo excitadas por radiación solar, la figura muestra el fenómeno de reabsorción y escape de luz

Por otra parte, tal como se ha mencionado, esta tecnología está enfocada para instalarse en las fachadas de grandes edificios; sin embargo, como ya se sabe, en la industria de la construcción las inversiones para el desarrollo de estos proyectos inmobiliarios son de montos millonarios. De esta manera, convencer a los inversionistas de apostar por una tecnología emergente suele ser poco atractivo para ellos, ya que es considerada como inversión de alto riesgo.

Para este tipo de situaciones, la propuesta es comenzar con pruebas piloto en un área segmentada de algún edificio; esto abonaría en datos sólidos de costo/beneficio de los CSL, para poder reducir el riesgo de inversión.

Prospectiva de los CSL

Con lo anteriormente discutido, la prospectiva en los próximos años para los CSL, a corto plazo, se deberá consolidar los materiales que integran el sistema; estos deberán ser amigables con el ambiente, con una vida útil relativamente larga y buenas eficiencias en los fenómenos ópticos que intervienen. Sin embargo, tal como ya se mencionó, el mayor reto es lograr el escalado del sistema a dimensiones mayores, típicamente en ventanales de algunos metros de longitud.

A mediano plazo, se deben instalar sistemas pilotos en segmentos de fachadas de edificios; esto contribuirá a evaluar los sistemas en condiciones reales y, en caso de resultados favorables, alentará a posibles inversionistas para el desarrollo de inmuebles con estos sistemas. Sin duda, esto puede ser impulsado en edificios gubernamentales, con el apoyo de los gobiernos locales de las grandes ciudades. Finalmente, a largo plazo, una vez que los sistemas de CSL reafirmen su potencial, la industria de la construcción deberá implementar la logística de instalación y uso masivo de esta tecnología.

Conclusión

Los concentradores solares luminiscentes representan una oportunidad innovadora para la industria de la construcción y el vidrio plano, ofreciendo una solución estética y eficiente para la recolección de energía solar. Su integración en ventanas y fachadas de edificios tiene el potencial de revolucionar la manera en que concebimos el uso de la energía en entornos urbanos, alineándose con las tendencias globales hacia una arquitectura más sostenible y autosuficiente. Sin embargo, la plena realización de su potencial dependerá de avances tecnológicos y colaboraciones estratégicas en el sector.

Referencias

- André, P. S. (2024). Artificial neural networks for predicting optical conversion efficiency in luminescent solar concentrators. *Solar Energy*, Vol 268, 112290.
- Arias, D. G. (2022). Estado del Arte: Incentivos y Estrategias para la Penetración de Energía Renovable. *Revista Técnica energía*, 18 (2), 91-103.
- Atradius. (2023). construction-industry-trends-global-overview-2023. Retrieved from <https://atradius.com.mx/publicaciones/construction-industry-trends-global-overview-2023-mx.html>
- Cámara Mexicana de La Industria de la construcción. (2024, Noviembre). Retrieved from https://www.cmic.org.mx/ceesco/Paginas/2023/Meses_Informe_Nacional_Construccion.htm

- Debije, M. G. (2012). Thirty years of luminescent solar concentrator research: solar energy for the built environment. *Advanced Energy Materials*, 2 (1), 12-35.
- Enerdata. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>
- Ferreira, R. A. (2024). Predicting the efficiency of luminescent solar concentrators for solar energy harvesting using machine learning. *Scientific Reports* 14 (1), 4160.
- Griffini, G. (2019). Host matrix materials for luminescent solar concentrators: recent achievements and forthcoming challenges. *Frontiers in Materials*, 6, 29.
- Intelligence, M. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/flat-glass-market>
- Kaysir, M. R. (2016). Modeling of stimulated emission based luminescent solar concentrators. *Optics Express*, 24 (26), A1546-A1559.
- México, G. d. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/normas-oficiales-mexicanas-en-eficiencia-energetica-vigentes>
- Moraitis, P. S. (2018). Nanoparticles for luminescent solar concentrators-a review. *Optical Materials*, 84, 636-645.
- Rafiee, M. C. (2019). An overview of various configurations of Luminescent Solar Concentrators for photovoltaic applications. *Optical Materials*, Vol 91, 212-227.
- Richards, B. S. (2023). Luminescent solar concentrators for building integrated photovoltaics: opportunities and challenges. *Energy & Environmental Science*, 16 (8), 3214-3239.
- Savaète, B. J. (2021). The World of the Flat-glass Industry: Key Milestones, Current Status, and Future Trends. *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture*, 1135-1146.
- Ten Kate, O. M. (2014). Quantifying self-absorption losses in luminescent solar concentrators. *Applied optics*, 53 (23), 5238-5245.
- UNEP. (2024, Noviembre). Retrieved from <https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- UNEP. (2024, Noviembre). Retrieved from. <https://www.unep.org/es/resources/informe/estado-mundial-de-los-edificios-y-la-construccion>