

EL VIDRIO FOTOCRÓMICO COMO MATERIAL CONSTRUCTIVO PARA LA ENVOLVENTE ARQUITECTÓNICA

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
ARQUITECTO PRESENTA:

Axel Mauricio Magos Martínez

Asesores | M. en Urb. Arq. Chisel Nayally
Cruz Ibarra
M. E. S. Arq. Manuel Guillermo
Hernández Contreras
Arq. Enrique Gándara Cabada

FACULTAD DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Ciudad Universitaria, CDMX, Marzo, 2023.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

La presente Tesis está dedicada a la memoria de mi padre, Carlos Wilfrido Magos Medina, el cual me enseñó a superar todos los obstáculos que se me puedan presentar en la vida pero sobre todo al motivarme a ser mejor cada día.

Mi padre me acompañó durante casi todo el trayecto de mi carrera, me apoyó para poder seguir adelante y me impulsó a lograr mis objetivos, gracias a él estoy en dónde estoy ahora. Espero que haya mucha luz en dónde sea quiera que estés, gracias por iluminar mi camino. Gracias por todo lo que me enseñaste.

Quisiera agradecer a mis amigos y compañeros que hice durante el transcurso de la Universidad. Que complementaron mi aprendizaje y me enseñaron mucho acerca de la Arquitectura, pero sobre todo me enseñaron valores que me formaron como persona.

Al final, éstas personas se volvieron la familia que tanto buscaba.

Y por último, le agradezco todo lo que tengo a la máxima casa de estudios, la UNAM. Que me brindó todas sus herramientas para poder llegar muy lejos, jamás creí poder llegar a lograr tanto, la UNAM no solo me dio un hogar, me dio una familia, me dio una experiencia de crecimiento en el extranjero, me dio una formación académica para poder entrar al ámbito profesional, me dio muchas risas, muchas lágrimas. Pero sobre todo, me hizo valorar el lugar en dónde estoy, en México, dónde existe una educación de alto nivel en la máxima casa de estudios con tantas oportunidades de crecimiento en donde logré estudiar a pesar de todos los obstáculos que tuve en el camino.

Gracias por todo,

Axel Mauricio
Magos Martínez

ÍNDICE

| | | | |
|---------|---|----|----|
| 1 | Introducción | | |
| 2 | Planteamiento del problema y justificación | 11 | |
| 3 | Marco Teórico | 13 | |
| 3 1 | Energía Solar | 13 | |
| 3 1.1 | Radiación Ultravioleta | | |
| 3 1.2 | Radiación Visible | | |
| 3 1.3 | Radiación Infrarroja | | |
| 3 2 | Propiedades Ópticas de los Materiales | 15 | |
| 3 2.1 | Emisividad | | |
| 3 2.2 | Absortividad | | |
| 3 2.3 | Reflectividad | | |
| 3 2.4 | Transmisividad | | |
| 3 2.5 | Color de la Luz y los Materiales | | |
| 3 2.6 | Propiedades Ópticas de los Acabados Interiores | | |
| 3 3 | Sistema Visual del Hombre | 17 | |
| 3 3.1 | Sistema Visual | | |
| 3 3.2 | Luminancia e Iluminancia | | |
| 3 3.3 | Contraste de luminancia y Deslumbramiento | | |
| 3 4 | Recursos Solares | 21 | |
| 3 4.1 | Variables que influyen en la Radiación Solar | | |
| 3 4.3 | Factor de Luz Diurna | | |
| 3 4.2 | Tecnologías Solares Pasivas | | |
| 3 5 | Sistemas de Control de Radiación Solar | 27 | |
| 3 5.1 | Elementos de Sombreado | | |
| 3 5.2 | Vidrios y Películas Reflejantes y Absorbentes | | |
| 3 6 | Materiales Inteligentes | 36 | |
| 3 7 | Materiales Cromogénicos | 40 | |
| 3 7.1 | Materiales Fotocrómicos | | |
| 3 7.2 | Materiales Termocrómicos | | |
| 3 7.3 | Materiales Mecanocrómicos / Piezocrómicos | | |
| 3 7.4 | Materiales Electrocrómicos | | |
| 3 7.5 | Materiales Quimiocrómicos | | |
| 3 7.6 | Materiales Magnetocrómicos | | |
| 3 7.6 | Materiales Biocrómicos | | |
| 3 8 | Materiales Fotocrómicos | 42 | |
| 3 8.1 | Materiales Cromogénicos Vs. Fotocrómicos ^o | | |
| 3 8.2 | Tipos de Materiales Fotocrómicos | | |
| 3 8.3 | Materiales Fotocrómicos Comerciales | | |
| 4 | Reflexión | | 56 |
| 5 | Reflexión | | 58 |

Se estudiarán sistemas de envolventes que combinen materiales convencionales y no convencionales (inteligentes y de alto desempeño) para la modulación de energía (térmica y lumínica) intercambiada entre el ambiente exterior y el interior para la provisión de condiciones térmicamente confortables. Se estudiarán condiciones de frontera dinámicas, donde la energía presente en el medio, tanto interior como exterior, modifique la estructura molecular de los materiales (inteligentes) cambiando sus propiedades térmicas y ópticas y por tanto, incrementando o disminuyendo la cantidad de energía transferida a través de la envolvente.

Las envolventes de los edificios son la parte constructiva que interactúa directamente con el exterior. La fachada o envolvente debe de tener la capacidad de captar, absorber, rechazar, modular y/o almacenar la energía que se encuentra en el ambiente para permitir que el espacio interno sea habitable y cumpla con las condiciones de confort que necesitan los usuarios; es decir, para protegernos del exceso de energía, pero también modularla para crear ambientes confortables para el hombre. La envolvente de los edificios, se construye con materiales de distintas propiedades físicas y por tanto, interactúan de forma diferente con los diferentes tipos de energía presente en el medio, incluyendo la energía solar que es la que se encuentra en más abundancia.

Un edificio debe de resguardar espacios confortables desde los siguientes aspectos:

– Visual. El ambiente lumínico de un espacio interior deberá presentar las cantidades de luz necesarias para una claridad visual.

Por otro lado, un edificio deberá presentar una cantidad de energía balanceada en su interior. Por ejemplo, la cantidad de radiación UV no deberá de presentarse en grandes cantidades para evitar la degradación química de las superficies interiores, pero tampoco deberá de presentarse en cantidades tan pequeñas que no contribuya a desinfectar el aire interior; la cantidad de radiación infrarroja no deberá de presentarse en cantidades tan grandes que sobrecaliente el interior de los espacios, ni tan poca que genere temperaturas por debajo del confort térmico; la cantidad de radiación visible tendrá que presentarse en cantidades adecuadas para no crear deslumbramiento o fuertes contrastes de luminancia o falta de iluminación y por tanto, falta de claridad visual.

Un edificio deberá ser eficiente energéticamente, es decir que los ambientes térmicos, lumínicos y acústicos se creen de forma natural o pasiva lo más que se pueda, para disminuir el uso de sistemas artificiales y mecánicos, como son los sistemas de aire acondicionado, la iluminación eléctrica y los sistemas de micrófonos y altavoces.

La envolvente de un edificio se compone de materiales opacos y transparentes. En cuanto a los materiales transparentes, éstos se han implementado principalmente, a lo largo de la historia como parte de ventanas y tragaluces para la captación y transmisión de la radiación solar. Además, para la regulación y modulación de la cantidad de radiación solar que penetra al interior, se han implementado elementos constructivos sombreadores (volados, aleros y parasoles), y materiales transparentes reflejantes y absorbedores de ciertas partes del espectro electromagnético de la radiación solar. Estos elementos y materiales, han sido parte de las envolventes para la regulación y modulación de la radiación solar que penetra al interior, pero “trabajando” de forma estática.

Una de las maneras de trabajar con las propiedades de la luz como diseñadores es con materiales fotocromáticos, los cuales la luz es su principal motor para su funcionamiento junto con los rayos UV. Nos interesan los materiales fotocromáticos no nada más por su capacidad de interactuar con la luz, si no también por sus aportaciones en arquitectura como la bioclimatización de los efectos ópticos y térmicos para el acondicionamiento del interior a partir de la envolvente que interactúa con el medio que lo rodea.

En el ámbito de la construcción, los materiales cromogénicos abrieron paso a las nuevas tecnologías de mejoramiento micro-climático y confort térmico al interior de las edificaciones, lo cual provoca ahorro en energía con un mejor desempeño en el aspecto lumínico y térmico, creando así un diseño más sustentable y una mejor interacción del edificio con los usuarios y el medio ambiente (Ferrara, 2014). En la arquitectura los materiales cromogénicos son especialmente utilizados en la envolvente, que es el medio del edificio por el cual interactúan el interior y el exterior de una edificación.

Ventanas Inteligentes / Una comparación entre materiales inteligentes utilizados en ventanas o en fachadas / Pros y contras.

El término “ventana inteligente” se ha aplicado a cualquier sistema que pretenda tener una superficie interactiva o conmutable compuesta de los materiales que hemos mencionado que son considerados inteligentes por su capacidad de transformar la energía o de cambiar sus propiedades. Las ventanas “inteligentes” normalmente tendrán una o más de las siguientes funciones:

- Control de la transmitancia óptica:

Puede utilizarse un cambio en la transparencia (la densidad óptica) del material para manejar la radiación solar incidente, particularmente en las longitudes de onda visuales y ultravioletas cercanas. La ventana podría variar de alta densidad (opaco o translúcido) para la prevención de la penetración directa del sol y su deslumbramiento asociado a baja densidad (transparente) a medida que la luz incidente pierde intensidad. Este es uno de los principios en los que nos basamos para estudiar los materiales fotocromáticos.

- Control de la transmitancia térmica:

Las longitudes de onda de interés se extienden en la región del infrarrojo cercano del espectro. La transmisión de calor por radiación puede ser disminuida cuando sea conveniente (verano) y maximizada para otras condiciones (invierno).

- Control de la absorción térmica:

La transparencia y la conductividad tienden a co-relacionarse entre sí, pero son relativamente independientes de la radiación incidente. Siempre que la temperatura interior es superior a la temperatura exterior, se establece un flujo de calor bidireccional: la energía radiante se transfiere hacia el interior, mientras que la energía térmica se transfiere al exterior. Alterando la absorción del acristalamiento afectará a la conductividad neta, y por lo tanto se puede desplazar a favor de una u otra dirección creando un equilibrio.

- Control de la vista:

El uso de materiales que cambian para controlar la vista es actualmente la aplicación de materiales inteligentes de mayor crecimiento en un edificio. Los paneles interiores y los tabiques que cambian de transparente a translúcido permiten la transmisión de luz, son capaces de moderar la vista alterando la propiedad del material. Un material especular transmitirá imágenes intactas, mientras que un material difuso oscurecerá la imagen. (Addington 2005) Éste es otro principio que utilizamos como fundamento el estudio de los materiales fotocromáticos, evitando el fastidio al ojo de la luz intensa o demasiado brillante, que también, a partir de su regulación, se obtiene la capacidad de volver espacios interiores más luminosos incluso hasta volviendo más opacas las entradas de luz.

El uso excesivo de sistemas de calefacción en climas fríos y de sistemas de acondicionamiento en climas más cálidos están generando el uso excesivo de electricidad para mantener tales sistemas. Esto a su vez conduce a un mayor uso de combustibles fósiles y más emisiones de dióxido de carbono y otros gases contaminantes. La cantidad creciente de dióxido de carbono están contribuyendo al problema del calentamiento global, aumentando la necesidad de una alternativa como la investigación en tecnologías para la reducción en sistemas de calefacción y aire acondicionado. Una de esas alternativas es la producción de materiales y películas delgadas que se pueden usar como revestimientos para vidrios de ventanas para construir ‘ventanas inteligentes’. Estas ventanas tienen el mayor uso en climas constantes. En climas fríos, se necesitan ventanas con alta transmitancia solar y baja emisividad térmica; esta permite que la luz del sol en el edificio ilumine la habitación, pero evita que el calor se escape y se caliente el cuarto. En climas constantemente calientes, se necesitan materiales que son transparentes en la región visible, pero reflejantes en el infrarrojo, como revestimientos metálicos delgados, se pueden utilizar para garantizar que el interior del edificio permanece fresco.

Estos revestimientos de control solar, sin embargo, plantean un problema en climas variables, como en el norte y Europa Central. Sin embargo, en Ciudad de México, debido a su ubicación geográfica, las temperaturas durante el año son más constantes. Para estos casos, materiales que tienen propiedades de alteración debido a factores externos alrededores podría ser la solución. Estos materiales “cromáticos” incluyen varias categorías, como vidrios y polímeros fotocromáticos, óxidos metálicos termocrómicos y materiales electrocromáticos.

REFERENCIAS

Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies*. Oxford: Architectural Press.

Pollo, R. (2015). *Progettare l'ambiente urbano: Riflessioni e strumenti*. Roma: Carocci editore S.p.A. Studio Agostini.

Lechner, N., (2015). *Heating, Cooling, Lighting, Sustainable Design Methods for architects*. New Jersey: John Wiley & Sons.

2 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En la República Mexicana tenemos la particularidad de que existen distintos tipos de clima pero no siempre se usan las estrategias adecuadas para conseguir un confort térmico interno sin la necesidad de sistemas de aire acondicionado o calefacción mecánicos (sistemas activos).

En la envolvente de un edificio, se pueden producir intercambios de energía entre el exterior y el interior mediante el uso de un sistema abierto para llegar al confort lumínico con métodos de energía pasiva. Recientemente se ha experimentado con materiales con propiedades ópticas como los materiales fotocromáticos para regular la luz que entra en una edificación permitiendo el intercambio de energía. (Addington, 2005)

La construcción de edificios con sistema cerrado y el uso de materiales envolventes que no toman en cuenta el contexto ambiental provocan el uso de energía eléctrica en iluminación artificial, que además de consumir recursos naturales no renovables, se produce CO₂ que contamina el ambiente y conlleva a daños a la salud (EMB Construction, 2012).

Hoy en día se reconoce el nivel crítico de la crisis ecológica no sólo en los organismos internacionales de investigación como el IPCC (intergovernmental Panel on Climate Change), cuyas conclusiones se han forjado en un pasado reciente sujeto a fuertes críticas de instituciones e investigadores vinculados de diversas maneras a la corriente económica

general, sino también por la gran prensa europea. Los estudios patrocinados por el Instituto Worldwatch (cfr. Assadourian, 2013) apuntan al aumento de la población mundial y el uso de los recursos (energía) no renovables para nuestras sociedades con el fin de llevar el consumo de energía individual a niveles compatibles con la producción de fuentes renovables. Los últimos datos del informe del IPCC mencionado (cfr. Pichs-Madruga, Edenhofer, Sokona, 2012), confirman que el cambio climático se deriva de las emisiones del sistema de producción y asentamiento humano y que los escenarios que se nos presentan son irreversibles.

Según el estudio recientemente publicado por el mismo instituto “el calentamiento global es inequívoco y muchos de los cambios observados desde los años cincuenta del siglo pasado no tienen precedentes con respecto a lo que se puede observar en los milenios. La atmósfera y los mares se calientan, la nieve y el hielo han disminuido, el nivel del mar ha aumentado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado.”

Es evidente que esta situación, además de requerir el desarrollo de tecnologías de ahorro de energía en todas las áreas, también requiere un fuerte cambio cultural. Una perspectiva basada exclusivamente en las tecnologías se muestra hoy, quizás, inadecuadas tanto para garantizar un crecimiento del bienestar individual y colectivo como para enfrentar la crisis ecológica.

Las propuestas de la ciudad inteligente “smart city”, a pesar de su interés tecnológico absoluto, no parecen, por sí mismas, capaces de contener los efectos negativos del desarrollo y la globalización, las propuestas carecen de un equilibrio entre sociedad, medio ambiente y economía, la demanda es cada vez más alta y los procesos industriales no se adaptan a los factores climáticos de cada región. El análisis de un proyecto se debe de basar en los elementos y factores locales para canalizarlos a su favor, aprovechando la energía que abunda en el exterior. (Pollo, R., 2015)

Un hecho contradictorio del desarrollo económico contemporáneo parece ser también la transferencia de producción manufacturera de países ya industrializados a otras áreas del planeta con poca atención al medio ambiente. Por otro lado, los comentaristas económicos subrayan la necesidad, para salir de la crisis económica, es de convertirse cada vez más en áreas económicas exportadoras. Sin embargo, el sistema económico global puede considerarse, como dice Jean-Paul Fitoussi, un sistema de suma cero. Por lo tanto, no es posible imaginar cómo puede haber un equilibrio y una adecuación económica mundial para todos los países sin que, por un lado, el agotamiento del medio ambiente y el otro por un flujo continuo de exportaciones. El saqueo de la naturaleza es ahora evidente ya que sus consecuencias son evidentes: el cambio climático, por un lado, el empobrecimiento de grandes áreas del planeta, por el otro. (UN, 2019).

En México no se ha desarrollado aun la consciencia de la eficiencia del uso de distintos materiales y estrategias en las envolventes. Es necesario poner a prueba los distintos materiales que faciliten el intercambio de energía del interior al exterior con base en las condiciones de la República Mexicana sobre todo en los aspectos térmicos y ópticos. Mediante estrategias de diseño se busca adaptar nuestros edificios a las condiciones ambientales para así reducir los efectos del calentamiento global por la quema de recursos fósiles y gasto energético mediante la prueba de materiales convencionales y no convencionales sobre todo en las envolventes.

Una de las claves de esta investigación la reducción del uso de energía eléctrica; la búsqueda de sistemas pasivos mediante superficies acristaladas se enfoca en el aprovechamiento de la luz diurna con el fin de reducir el consumo energético

mediante el uso de iluminación artificial.

Mediante materiales con propiedades ópticas y los elementos arquitectónicos que generan un ambiente lumínico podemos aprovechar el mayor tiempo posible durante el día para mantener los niveles de luz adecuados para las actividades que se desarrollan en un espacio.

El sistema visual del ser humano ha dado varias pautas para el diseño arquitectónico: el contraste lumínico, lumínico, niveles de luz, deslumbramiento, etc. Son algunos efectos que se toman en consideración en la proyección de edificaciones, ya que el confort y la habitabilidad son fundamentales para el desarrollo de actividades y la salud.

Utilizando los parámetros que se han establecido y las estrategias de diseño basadas en el confort visual del ser humano se pueden explorar materiales con propiedades ópticas que permiten la regulación de las ondas electromagnéticas para alcanzar los niveles requeridos para el desarrollo de ciertas actividades.

Los materiales inteligentes, traslucidos con propiedades cromogénicas pueden ser utilizados en envolventes a partir del estudio de sus propiedades, estableciendo parámetros que pongan a prueba su eficiencia y su uso como elementos de sombreado o regulación lumínica.

La envolvente debe de ser capaz de adaptarse así como un sistema “vivo” a estas condiciones y aprovecharse de ellas a partir de materiales opacos y traslúcidos que pueden ser dinámicos, convencionales y no convencionales (inteligentes como los fotocromáticos o de alta eficiencia) para la modulación de la energía térmica y lumínica.

REFERENCIAS

Organización de las Naciones Humanas (Enero,2019) Cambio Climático. Recuperado de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>

EMB Construcción (Octubre, 2012) Metecno. Recuperado de <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=1961&edi=92&xit=edificios-son-responsables-de-hasta-un-35-de-las-emisiones-de-co2-a-nivel-mundial>

Pollo, R. (2015). Progettare l'ambiente urbano: Riflessioni e strumenti. Roma: Carocci editore S.p.A. Studio Agostini.

3 |

3 | 1

ENERGÍA SOLAR

Parte de la energía solar es radiación electromagnética. La energía radiante, o radiación electromagnética, es energía en movimiento a través del espacio de forma oscilatoria con base en ondas eléctricas y magnéticas. La radiación es generada cuando una carga eléctrica se acelera; esto ocurre como resultado de la rápida oscilación de los electrones en los átomos. Las oscilaciones liberan “paquetes” durante ciertos periodos llamados fotones que viajan fuera del origen de la vibración a la velocidad de la luz, y emiten ondas electromagnéticas con un periodo de crecimiento (cresta) y decrecimiento (valle) que describe un ciclo.

La radiación electromagnética está compuesta por su energía (E), amplitud de onda (λ), la distancia entre la cresta y el valle, la frecuencia (ν). Entre más ciclos haya por unidad de tiempo, más intensa será la energía de la radiación electromagnética. Las ondas se pueden medir desde nanómetros hasta kilómetros. La luz visible es la más responsable de nuestra percepción del mundo. La longitud de la onda es inversamente proporcional al contenido energético del fotón. Entre más grande sea la onda, menos energía tienen los fotones. Entre más pequeña sea la onda, más energía presentan los fotones.

MARCO TEÓRICO

Existen dos parámetros clave de la luz: su intensidad o energía y su composición espectral. La intensidad es la cantidad de fotones por unidad de área en una dirección particular.

El sol es la principal fuente de luz para nosotros, y también establece el estándar de comparación para las fuentes de luz artificial. Mientras que todos los objetos producen radiación, lo hacen en diferentes partes del espectro. El sol emite energía de radiación principalmente (95%) en un rango de longitudes de onda de aproximadamente 2×10^{-7} (200 nanómetros) a 4×10^{-6} m (4000 nanómetros), alcanzando un máximo en la parte visible (45% de la radiación solar) del espectro electromagnético y extendiéndose hacia el ultravioleta (10 %) e infrarrojo cercano (45%). (Addington, 2005)

3 | 1.1 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

El ultravioleta A (UVA) está más próximo a la región violeta del espectro visible y se encuentra en el intervalo de longitudes de onda de 320-400 nm. Esta radiación es en gran parte responsable del bronceado. El ultravioleta B (UVB), dentro del intervalo de 280-320 nm, es más dañino

y causa quemaduras solares. La radiación ultravioleta con longitudes de onda más cortas se denomina ultravioleta lejano, (200-280 nm) y posterior a éste está el ultravioleta al vacío (por debajo de 200 nm). La radiación ultravioleta, y en general la radiación de longitudes de onda más cortas, son capaces de dañar las células biológicas severamente, y la exposición excesiva a éstas conduce a la aparición de enfermedades de la piel. (Lechner, 2015)

3 | 1.2 RADIACIÓN VISIBLE

La extensión del espectro visible se define en términos de la longitud de onda o frecuencia de las ondas de luz implicadas y se define como la única parte del intervalo de longitudes de ondas electromagnéticas detectable por el ojo humano por medio de las células que lo componen llamadas conos y bastones las cuales tienen la capacidad de comunicarse con el cerebro para traducir su información con lo que percibimos como luz y color. (Ver Figura 1)

La percepción de las diferentes longitudes de onda se llama color. La medición precisa del color implica una determinación de la energía presente en cada longitud de onda en la luz usando un espectrómetro.

El rango de longitud de onda que un ojo puede percibir varía de individuo a individuo. En general, se supone que la longitud de onda más corta de luz que una persona promedio puede detectar corresponde al color violeta, con una longitud de onda cercana a 380 nm.

De forma similar, la longitud de onda más larga de la luz registrada por un observador promedio corresponde al color rojo, con una longitud de onda cercana a 750 nm. Entre estos dos límites se asocian las otras longitudes de onda del espectro con la secuencia de color de rojo a naranja, verde, azul, índigo y finalmente a violeta.

3 | 1.3 RADIACIÓN INFRARROJA

La radiación con longitudes de onda más largas que el rojo se denomina radiación infrarroja (IR).

Es el tipo de radiación que produce calor; entre más abundante sea, más aumenta la temperatura.

Aunque no son visibles, las longitudes de onda más largas de la radiación infrarroja, llamada infrarrojo térmico, son detectables como la sensación de calor en la piel.

La radiación infrarroja es la causante del “efecto invernadero”, el cual es un proceso de acumulación de calor después de que la radiación ultravioleta (UV) y/o visible pasa por un material transparente, para posteriormente ser absorbido por los materiales y ser re-emitida en forma de radiación infrarroja (calor). La radiación infrarroja se va acumulando al no poder transmitirse por el material transparente (a la radiación visible y ultravioleta pero no a la infrarroja) al exterior generando espacios que pueden llegar a ser inhabitables. (Lechner, N., 2015)

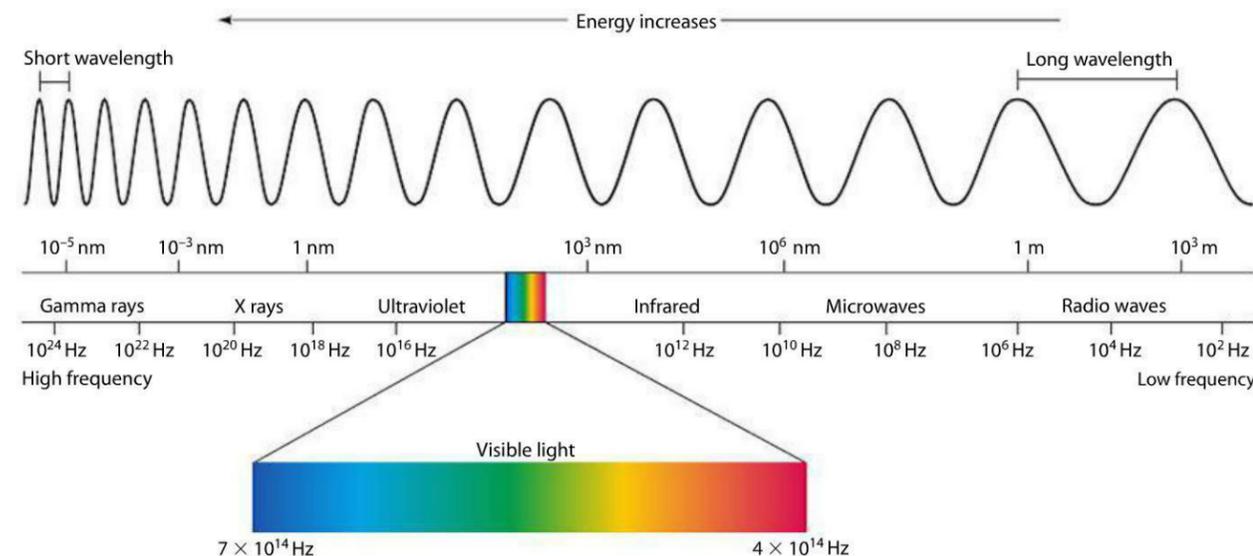


Figura 1. Gráfica de los espectros electromagnéticos: tipos de onda, longitud de onda, cantidad de energía. (Mini Physics, 2016).

3 | 2 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES

Cuando la luz tiene contacto con la superficie, ésta puede ser absorbida, transmitida y/o reflejada (ver definiciones). La cantidad de efecto para cualquier superficie es determinada por la suma de las propiedades. La cantidad de cada propiedad depende de las cualidades de la superficie así como de la estructura del material. Debido a que la longitud de onda de la luz es tan pequeña, los cambios extrínsecos en la estructura superficial pueden afectar dramáticamente la interacción del material con la luz. Por ejemplo, el trabajo mecánico de una superficie mediante laminación en frío atará los electrones libres en la superficie de un metal, reduciendo así su capacidad de re-emitir radiación electromagnética. Como resultado, un material como el aluminio puede tener una reflectancia de 0.60 si está grabado, pero de 0.80 si la superficie está pulida. Si la luz es reflejada, será reflejada con el mismo ángulo al que llegó a la superficie pero en otra dirección al igual que las ondas acústicas conocida como la ley de reflexión.

Difusión versus espectacularidad: las superficies especulares son microscópicamente lisas y planas de tal manera que el plano de cualquier característica de superficie se encuentra en el mismo plano que la superficie total. Los espejos y las superficies muy pulidas tienden a ser especulares. Las superficies difusas tienen irregularidades superficiales que no se encuentran en el mismo plano que la superficie total. En éstas, la ley de reflexión todavía se aplica, pero el ángulo de incidencia es particular a la característica de la superficie sobre la cual inciden cada fotón, dando por resultado la dispersión de la luz.

Cuando la luz es transmitida, se refractará en un ángulo relacionado con el índice de refracción de los dos medios. Es conocido como la ley de la refracción: cuando la luz pasa de un medio a otro, su camino es desviado. El grado de la desviación es dependiente a la propiedad del material conocida como índice de refracción (n). El valor de “n” es medido con respecto al paso de la luz a través de un vacío, que da como resultado todos los medios transparentes desde el aire hasta un diamante teniendo diferentes índices de refracción. Solo cuando la luz incidente es normal (perpendicular) a

la superficie, el ángulo del camino continuará en una línea recta. Ángulo crítico: Si el índice de refracción del material transmitiendo la luz es mayor que el índice de refracción del material en el que la luz se transmitirá, entonces existe un ángulo crítico más allá del cual la luz no transmitirá pero se reflejará internamente de nuevo en el primer material. (Addington, 2005)

3 | 2.1

EMISIVIDAD

Expresada como una relación sin unidad del 0 a 1 (ó porcentaje).

Es la medida de la capacidad de una superficie para emitir radiación térmica con relación a la que sería emitida por un “cuerpo negro” ideal a la misma temperatura. La superficie depende no sólo del material y la temperatura de la superficie, sino también de las condiciones superficiales. Las superficies arañadas tienden a tener emisividades más altas que las superficies pulidas del mismo material a la misma temperatura.

3 | 2.2

ABSORTIVIDAD

Expresada como una relación sin unidades de 0 a 1 (ó porcentaje).

Es la medida de la cantidad de radiación térmica que realmente es absorbida, contenida internamente, por un material con respecto a la cantidad total de radiación térmica que es incidente en su superficie. En relación con la capacidad de absorción se encuentran la reflectividad.

3 | 2.3

REFLECTIVIDAD

Expresada como una relación sin unidades de 0 a 1 (ó porcentaje).

Es la cantidad de radiación térmica reflejada desde la superficie, radiación bloqueada y rebotada a manera de “espejo” al ángulo de incidencia. Se llama ángulo de incidencia al formado por el rayo incidente y la normal de la superficie. La normal es una recta imaginaria perpendicular a la superficie de separación de los dos medios en el punto de contacto del rayo. El ángulo de reflexión es el formado por el rayo reflejado y la normal. La suma de la reflectividad y la absorptividad debe ser igual a uno que equivale a la incidencia de radiación total en un cuerpo expresada como:

$$I = R + A = 1$$

La continuidad de sus niveles de intensidad en la parte visible del espectro proporciona un nivel uniforme de iluminación en las superficies, permitiéndoles reflejar cualquier color determinado por sus características superficiales.

3 | 2.4 TRANSMISIVIDAD

Es la cantidad de radiación electromagnética transmitida a través del material con respecto a la total incidente.

(Ver Figura 2)

Las tres relaciones que solo se puede aplicar para materiales transparentes debido que es la proporción de radiación que es capaz de atravesar el material son la reflexión, la absorción y la transmisión. Por lo tanto, la suma de la transmisividad, la reflectividad y la absorptividad debe ser igual a uno que equivale a la incidencia total de radiación en un cuerpo expresada como:

$$I = R + A + T = 1$$

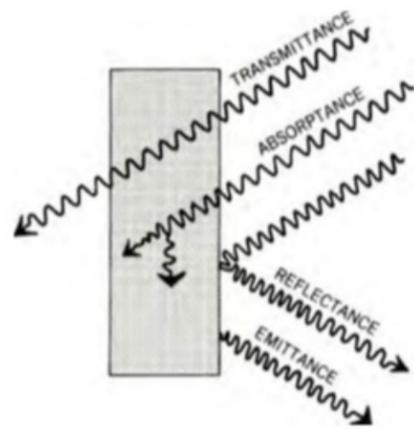


Figura 2. Representación de la incidencia de radiación en materiales transparentes. (Lechner, 2015).

3 | 2.5 COLOR DE LA LUZ Y LOS MATERIALES

El color pertenece solamente a la luz. Todas las superficies son sustractivas en el sentido de que sólo pueden sustraer

la energía y el color de la luz, no añadirla. Por ejemplo, la distribución espectral de una lámpara de sodio de baja presión tiene un ancho de banda muy estrecho, con longitudes de onda confinadas al rango amarillo. Cuando un coche azul es estacionado bajo esta lámpara, la superficie del coche sólo puede reflejar lo que se le proporciona, y en este caso sólo puede reflejar los colores azules. En el mejor de los casos, el coche parecerá ser de color marrón oscuro, e incluso puede parecer negro si no hay componentes amarillos en su pintura.

Podemos describir el color de las fuentes de luz y el color reflejado de los objetos con tres cantidades: energía, longitud de onda y ancho de banda. El nivel de energía nos dice cuán brillante, la longitud de onda nos dice qué tonalidad y el ancho de banda nos dice con qué saturación. Comparando los tipos de luz artificial podemos decir que el láser contiene una energía muy alta que indica una luz muy brillante, su longitud de onda podría ser de 640 nm, produciendo luz roja y la longitud de la banda es muy estrecho entrando por completo o casi por completo al rango visible rojo, mientras que la luz de una lámpara incandescente produce una luz blanca porque pasa en el rango de luz visible donde se adicionan los colores primarios, pero su energía es baja la cual pasa a través del rango de los infrarrojos emitiendo mucho calor comparado con la luz que genera. (Addington, 2005)

El color de una superficie puede describirse de la misma manera que para la fuente mediante un perfil espectral. Una fuente con luz de longitudes de ondas en todo el espectro visible hace que los objetos se vean de manera precisa, pero por ejemplo un pigmento azul puede parecer totalmente absorbente (negro) si no hay componentes de longitudes de onda cortas en la fuente de luz. Por esta razón, a menudo escogemos la neutralidad de una luz blanca de espectro continuo para asegurar que los colores se representen con precisión. La luz que se refleja en una superficie se convierte también en una fuente, pero en una disminuida.

3 | 2.6 PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS ACABADOS INTERIORES

Al interior de los edificios se encuentran diversos elementos

arquitectónicos que juegan un papel fundamental en el ambiente lumínico:

Techos, muros, pisos, estructura, cancelerías, ventanas, etc. Estos elementos están compuestos de diferentes materiales; cada material expuesto al intemperie, es decir, los acabados finales de cada material tienen en su superficie propiedades ópticas que reflejan, absorben y transmiten la luz. Mediante la interacción de los elementos arquitectónicos con sus valores de reflectancia, absorptancia y transmitancia en sus superficies (acabados) se genera un ambiente lumínico dentro del espacio.

REFERENCIAS

Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies*. Oxford: Architectural Press.

Lechner, N., (2015) *Heating, Cooling, Lighting, Sustainable Design Methods for architects*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Illuminating Engineering Society (IES, 2020).

3 | 3 SISTEMA VISUAL DEL HOMBRE

El interior de un espacio arquitectónico se caracteriza por ser un entorno singular y estable que se puede optimizar manteniendo condiciones ideales. De hecho, uno de los modelos más prevalentes del ambiente interior "perfecto" es el de la cápsula espacial. El entorno exterior se considera totalmente hostil y solo la creación de un entorno interior separado y altamente controlado puede completar este contenedor ideal para el hombre. Esta exaltación del entorno espacial fue la culminación de casi un siglo de investigación para definir las condiciones térmicas más saludables para el cuerpo humano. En la década de 1920, con el advenimiento de los sistemas ambientales mecánicos, los estándares para ambientes interiores comenzaron a codificarse para

aplicaciones específicas. Se esperaba que las habitaciones de las escuelas se mantuvieran a temperatura y humedad relativa constantes, y que las fábricas se encontraran en otro conjunto de condiciones constantes. En el transcurso del siglo XX, las inquietudes sobre la salud disminuyeron y los estándares se ajustaron para mayor comodidad.

Según Addington (2005), esta caracterización del entorno interior es reconocible para nosotros como un sistema térmico en el que el interior es el sistema material, la envolvente del edificio es el límite y el exterior es el entorno. Addington también menciona que si re-formulamos el entorno humano, nos damos cuenta de que el sistema material real es el cuerpo, el límite es el intercambio de energía del cuerpo y el entorno circundante que está inmediatamente adyacente al cuerpo. Los entornos del edificio pueden ser análogos a este sistema, pero es una analogía de la abstracción más que de la realidad.

También, Addington describe que el diseño de la caja no es el diseño de un entorno y que todos los entornos son campos de estímulo de energía que pueden producir intercambio de calor, aparición de luz o recepción de sonido. En lugar de caracterizar todo el entorno representado por una temperatura global, o un nivel de iluminación de lux constante, se define el entorno solo a través de sus transacciones de energía o intercambios a través de los límites, incluidos los del cuerpo humano. Este enfoque es consistente con la comprensión actual del sistema sensorial del cuerpo. Ya sea térmico, auditivo u óptico, los sentidos de nuestro cuerpo responden no sólo a las condiciones del estado (temperatura, nivel de luz, etc.), sino a la tasa de cambio de energía a través del límite. Por ejemplo, la sensación de frío no representa un entorno a baja temperatura, sino que es una indicación de que la tasa de cambio de transferencia de energía térmica entre el medio ambiente y el cuerpo está aumentando; la temperatura del ambiente puede o no ser uno de los muchos posibles contribuyentes a este aumento. Esencialmente, el cuerpo se siente a sí mismo a través de su reacción al entorno que lo rodea, pero no detecta el entorno. (Addington, 2005)

Envoltentes de nuestro cuerpo que trabajan el ambiente lumínico:

Nuestra piel funciona como barrera entre nuestro cuerpo y el medio ambiente. Nuestros ojos tienen la misma función pero con el ambiente lumínico.

En el límite localizado cerca de la parte trasera del ojo en la pequeña región compuesta de nuestros receptores visuales se encuentran los conos y los bastones (ver Figura 3).

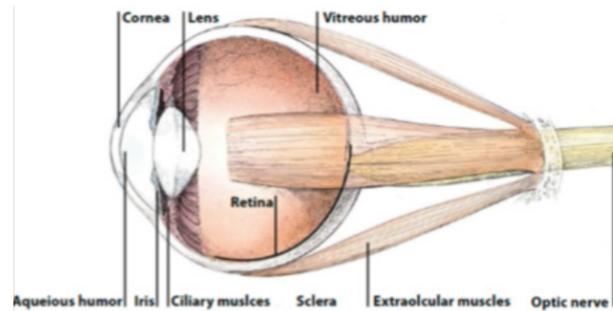


Figura 3. Anatomía del ojo humano. (IESNA, 2011).

Éstos receptores absorberán selectivamente ciertas longitudes de onda con ciertos niveles de energía. Los bastones son las células sensoriales del ojo para la percepción de luz de baja intensidad; no detectan colores. Los conos son las células sensoriales que detectan luz de alta intensidad y colores. Estos se pueden categorizar, según la longitudes de onda que se detecten y que el cerebro traduce como color en: a) conos de longitud de onda larga (rojos), conos de longitud de onda media (verdes) y conos de longitud de onda corta (azules). (ver Figura 4)

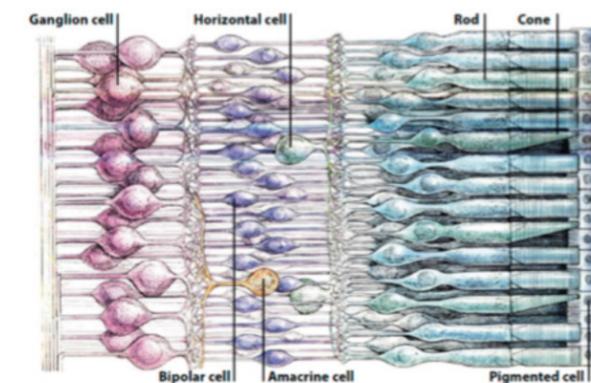


Figura 4. Anatomía del ojo humano. Conos & Bastones (IESNA, 2011).

Tipos de visión

Teniendo consciencia de como percibe el ojo la luz, el color, los objetos y el espacio a través del ojo, nos da la capacidad de poder trabajar con sus efectos. Sobre todo los arquitectos y diseñadores pueden usar la luz como herramienta de diseño alterando, manejando y controlando los efectos de la luz en el ser humano y el espacio.

Durante el día, las células sensoriales del ojo que más trabajan son los conos por haber una mayor cantidad de luz de alta intensidad con respecto a la noche. Es por esto que los conos trabajan más que los bastones, para detectar luz de alta intensidad. Durante el día, por tanto, se perciben los colores de mejor forma que durante la noche. A la visión que el hombre tiene durante el día se le llama fotópica. El sistema visual durante el día, basado principalmente en los conos, es más sensible en captar longitudes de onda de alrededor de 555 nm (colores verde-amarillo). Es decir, que estos colores se detectan con mayor brillo.

Visión escotópica

Durante la noche, las células sensoriales que más trabajan, son los bastones, los cuales detectan luz de baja intensidad, pero no colores. Esto no significa que los conos no estén trabajando; éstos siguen trabajando, pero en menor intensidad. Por tanto, algo de colores se detectan en la noche, aunque no con muy buena definición. A la visión que se tiene durante la noche se le llama escotópica y es más sensible en captar longitudes de onda de alrededor de 500 nm (colores verde-azulado).

Detección de color a través del sistema visual

Las longitudes de onda de la luz percibida por las células sensoriales del ojo, son traducidas por el cerebro como color. Como ya habíamos mencionado, hay células que se encuentran dentro del ojo humano que perciben un rango de longitudes de onda como luz y color. Dichas células se comunican con la parte occipital del cerebro que es donde se encuentra la corteza óptica visual. Dentro de la parte occipital, la corteza del cerebro capta las imágenes y se encarga de descifrar la imagen para percibirla e identificarla como un objeto por medio del “que” y el “donde”. El cerebro solo es capaz de identificar las imágenes a partir de los contrastes del luz (materia que refleja o emite baja luminosidad a lado de alta luminosidad) donde puede diferenciar un elemento de otro, también se puede manifestar por contrastes de color que actúan para identificar los elementos del entorno. (MBC Aries. 2013).

Las diferencias luminosas y el contraste de color son necesarios para la visión. La impresión acromática se puede

ver debido a la diferencia de luminancia entre la página blanca y la impresión en negro.

Del mismo modo, un espacio interior es visible debido a las diferencias de brillos de las superficies. Las variaciones de brillo son una función de las reflectancias absolutas y espectrales de las superficies y de la distribución de la luz en esas superficies.

Las grandes variaciones de brillo pueden ser problemáticas. Los interiores de las oficinas deben estar iluminados para proporcionar una buena visibilidad sin deslumbramientos molestos. El resplandor directo y reflejado debe evitarse; sin embargo, es importante proporcionar suficiente variación en la luminancia o el color para contribuir a un entorno simulado y atractivo. Cuando no hay tareas visuales prolongadas, como en vestíbulos y pasillos y en áreas de recepción, conferencias, sala de estar y comedor, se fomentan variaciones en el brillo, usando colores atractivos y puntos focales apropiados de altas iluminancias para llamar la atención.

Proporciones de luminancia

Para un entorno de oficina, las luminancias cercanas a cada tarea y en otras partes del interior de la oficina dentro del campo de visión deben equilibrarse con la luminancia de la tarea. Dos fenómenos separados están influenciados por las relaciones de luminancia dentro del campo de visión: adaptación oscura y luz y deslumbramiento por discapacidad. Para limitar los efectos de estos fenómenos, las relaciones de luminancia generalmente no deben exceder lo siguiente:

- Entre la tarea en papel y la pantalla VDT adyacente: 3: 1 o 1: 3
- Entre la tarea y los alrededores oscuros adyacentes: 3: 1 o 1: 3
- Entre tareas y superficies remotas (nano adyacentes) 10: 1 o 1:10 (Rea y IESNA, 2000, 11-3)

Sin embargo, no es práctico o estéticamente deseable mantener estas relaciones en todo el entorno. Para el interés visual y el enfoque ocular distante (para la relajación periódica del músculo ocular a lo largo del día), son deseables las áreas visuales pequeñas que exceden las recomendaciones de relación de luminancia. Esto incluiría obras de arte, acabados de acento en paredes, techos o pisos, áreas de ventanas pequeñas, acabados acentuados en sillas y accesorios e iluminación focal de acento. Adaptación transitoria durante los cambios de brillo y de luminancia

El sistema visual ajusta sus características operativas como resultado del cambio en los brillos dentro del campo de visión. Durante este proceso de adaptación, se producen cambios fotoquímicos, neurológicos y pupilares. Los cambios neuronales se producen principalmente de forma rápida, aunque las capacidades visuales se ven afectadas temporalmente mientras el sistema visual se reajusta. Esto se conoce como adaptación transitoria, la cual se completa después de un tiempo muy corto. Los cambios fotoquímicos ocurren mucho cuando son más leves y se notan más cuando hay un cambio dramático en el nivel alto ambiental, como pasar de plena luz del día a un teatro más oscuro. Los cambios pupilares son relativamente insignificantes en el proceso de adaptación (IESNA, 2000).

Criterios de relación de luminancia

Esta evaluación se basó en la forma en que el sistema visual humano percibe la luz. Aunque el sistema visual no es muy bueno para identificar niveles absolutos de luminancia, es bastante capaz de percibir diferencias relativas. El sistema visual se ajusta al rango de niveles de luminancia en el campo visual. Si la diferencia entre el nivel de luminancia de la superficie de la tarea y el nivel de luminancia de su entorno es demasiado pequeña, entonces el sistema visual tiene dificultades para percibir el entorno y distinguir los detalles. Si la diferencia es demasiado grande, entonces el sistema visual debe adaptarse constantemente a los niveles extremos, lo que da como resultado una visibilidad reducida o incomodidad debido al deslumbramiento (Importante, justificaciones de la tesis) (Ruck 1989; Rea e IESNA 2000). Por lo tanto, dentro de los límites, la magnitud de las diferencias de nivel de luminancia entre las superficies en un espacio puede servir como un indicador de la calidad de iluminación percibida en ese espacio.

3 | 3.2 LUMINANCIA E ILUMINANCIA

Si usamos una fuente de luz para brindarle luz a un objeto y se mide la cantidad de luz que proyecta hacia él, eso es iluminación. (Wilkinson, 2020).

La cantidad de luz que emite una fuente se mide en lúmenes. La intensidad luminosa es una de las magnitudes fotométricas. Relaciona el flujo luminoso con el ángulo del haz de una fuente de luz. La intensidad luminosa indica, por tanto, la concentración de la luz o la densidad de la luz

emitida. La intensidad luminosa se indica en candelas (cd). La iluminancia se mide en lux, que sería la cantidad de lúmenes por metro cuadrado en una superficie. En cambio, la luminancia es la cantidad de luz reflejada por la superficie que se ilumina por esa fuente de luz a nuestro ojo. La luminancia se mide en cd/m²; la cantidad de candelas reflejadas por cada metro cuadrado de la superficie. (Ver Figura 5).

El cociente del flujo luminoso en un elemento de la superficie que rodea el punto, y propagado en direcciones definidas por un cono elemental que contiene la dirección dada, por el producto del ángulo sólido del cono y el área de la proyección ortogonal del elemento de la superficie en un plano perpendicular a la dirección dada. El flujo luminoso puede estar saliendo, atravesando y/o llegando a la superficie. Anteriormente, brillo fotométrico. (Ver Figura 6)

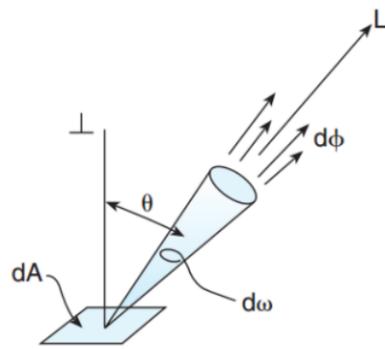


Figura 6. Representación gráfica del concepto de luminancia. (IES, 2020)

Su fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$L = \frac{d^2 \Phi}{d\omega dA \cos \Theta}$$

Dónde; $d^2 \Phi$ representa la cantidad de luz reflejada al ojo medido en candelas (cd).

Entre el área (ωdA) de la superficie iluminada por metro cuadrados(m²).

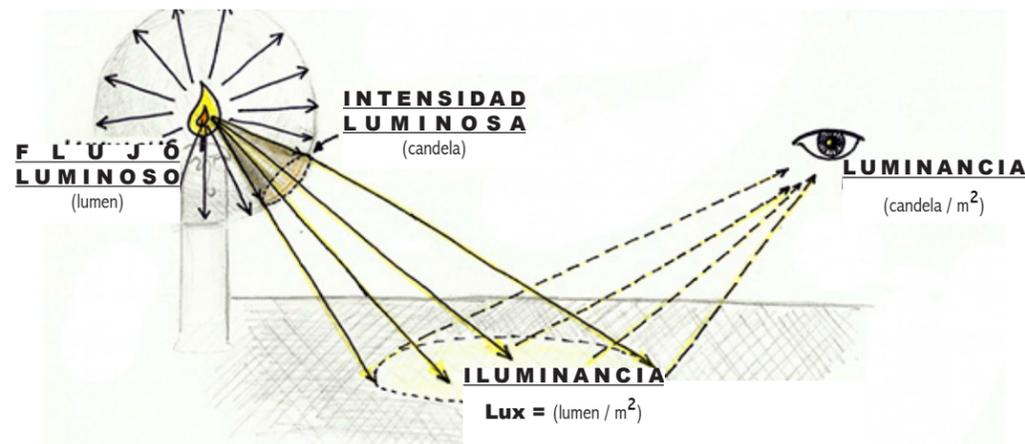


Figura 5. Representación de la luminancia, iluminancia, intensidad luminosa y flujo luminoso (Acqua Teknica, 2022).

Dónde; $\cos \Theta$, es el producto del flujo luminoso y la intensidad luminosa de la fuente reflejado en una superficie con ciertas propiedades ópticas de los materiales.

3 | 3.3 CONTRASTES DE LUMINANCIA Y DESLUMBRAMIENTO

Según la Illuminating Engineering Society (IES), el deslumbramiento es la sensación producida por luminancias (valores en cd/m² en las superficies) dentro del campo visual que son lo suficientemente mayores que la luminancia a la que están adaptados los ojos para causar molestia, incomodidad o pérdida en el rendimiento visual o visibilidad.

La magnitud de la sensación de deslumbramiento depende de factores como el tamaño, la posición y la luminancia de una fuente; el número de fuentes; la luminancia a la que se adaptan los ojos y el contraste entre los valores de luminancia entre las superficies dentro del campo visual.

El contraste de luminancia se define en la norma australiana 1428.1-2009 como "la luz reflejada desde una superficie o componente, en comparación con la luz reflejada desde otra superficie o componente". No es simplemente la diferencia en el contraste de color, sino la diferencia en las propiedades de reflexión de la luz de cada color.

Esto causa un efecto visual en el sistema visual del hombre llamado "deslumbramiento por contraste", en el cual se perciben las superficies con valores escasos de luminancia como muy oscuros mientras las superficies con altos valores de luminancia se perciben muy brillantes causando la sensación de deslumbramiento.

REFERENCIAS

Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies*. Oxford: Architectural Press

MBC Aries. (2013). *Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment*. Eindhoven: The society of light and lighting, artículo,

Mark Rea, *The IESNA Lighting Handbook* (New York: IES, 2000)

Illuminating Engineering Society (IES, 2020).

3 | 4

RECURSOS SOLARES

La radiación solar es la fuente de energía fundamental, el elemento básico para la vida en nuestro planeta. Sus variaciones en el tiempo (las estaciones, el día) y en el espacio están en el origen del clima y sus diferencias en las diversas áreas geográficas.

El sol se puede definir como una estrella, cuya superficie consiste esencialmente de hidrógeno (aproximadamente 74% de su masa, el 92% de su volumen) y helio (aproximadamente 24 - 25% de la masa, 7% de su volumen), que mantiene una temperatura constante estimada en 5,750 K.

En el espacio, esto equivale a una energía emitida de 3.88 x 1,028 W.

La cantidad de energía que, fuera de la perpendicular a los rayos solares, llama "constante solar", es equivalente a 1,353 W.

Dentro de la atmósfera, esta misma cantidad de energía se divide en diferentes componentes.

En el balance anual de radiación solar que afecta a la Tierra, una parte, alrededor del 60%, se refleja desde la atmósfera. 16% contribuye a la evaporación de los océanos, el origen del ciclo del agua y la energía hidráulica. 11.5% se refleja desde la superficie de la tierra, en cantidades variables según el tipo de suelo. El 9.5% es absorbido por el suelo y la atmósfera y aproximadamente el 3% alimenta los procesos de la fotosíntesis terrestre y acuática.

La atenuación de la cantidad original de energía es una función de la composición de la atmósfera atravesada y de la distancia recorrida por el rayo solar para alcanzar la superficie en el objeto.

La suma del componente directo y el difuso en la atmósfera constituyen la cantidad de radiación solar realmente disponible para irradiar una superficie. Sin embargo, hay otras variables que contribuyen a variar la cantidad de energía solar disponible.

Las diferentes regiones no reciben la misma cantidad de energía solar. Por ejemplo, en el sur de Francia tenemos 2,882 horas de sol al año, mientras que en el norte de Francia tenemos solo 1,514. El territorio mexicano es aun más grande que Francia, así que podemos imaginar el contraste de horas del sol al año entre el norte y el sur de nuestro territorio es aun más grande, lo cual genera condiciones ambientales climáticas muy diferentes entre cada zona. Es por este motivo por el cual no se pueden establecer una serie de normas de diseño sustentable generales para todo un continente o un grupo de países, tal vez ni siquiera para un país.

La energía solar está presente en todas partes, es intermitente, de acuerdo con los ciclos diarios y estacionales, disponible y limpia (Pollo, 2015).

Sin embargo, por medio de estrategias de diseño arquitectónico, análisis e instalaciones técnicas apropiadas se pueda transformar la radiación solar en calor y electricidad.

3 | 4.1 VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA RADIACIÓN SOLAR

La irradiación solar de una superficie depende de factores astronómicos, como la declinación de los rayos del sol, la hora del día y la latitud del sitio. De elementos estrechamente relacionados con la superficie en el objeto, como la orientación e inclinación, o las características del sitio donde se ubica el proyecto, como la orografía, la presencia de vegetación y el nivel de contaminación del aire. La declinación solar se define como el ángulo central

subtendido por un arco demeridiano celeste entre el ecuador celeste y el paralelo a través del objeto, se refiere. Por lo tanto, a la esfera celeste y la posición adoptada por el sol en él (Pollo, 2015).

En otras palabras, está representado por el ángulo de los rayos del sol con respecto al plano del ecuador. Su variabilidad durante el año depende de la inclinación del eje terrestre al plano de la órbita. (Ver Figura 7)

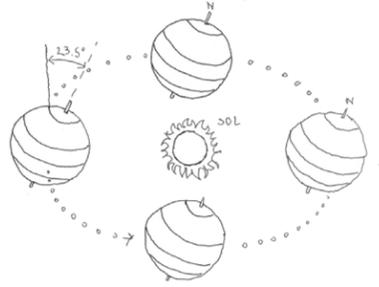


Figura 7. Representación de la traslación de la tierra. Elaborado por el autor.

Convencionalmente, la declinación se mide en grados norte del ecuador, por lo tanto, apuntan al norte del ecuador tener declinación positiva, mientras que aquellos del sur tienen una declinación negativa.

Para analizar lo primero es necesario introducir algunos conceptos simples de la astronomía y, en primer lugar, pensar en el movimiento efectuado por la Tierra alrededor del Sol, es decir, la posición que asume debido al movimiento de la revolución terrestre; de hecho, la Tierra sigue una órbita elíptica alrededor del Sol. Los momentos más significativos, sin embargo, son los solsticios y los equinoccios: en el solsticio de invierno (21 de diciembre), el Sol alcanza su altura más baja en el horizonte al mediodía, correspondiente a la declinación de $-23^{\circ} 12'$; por el contrario, en el solsticio de verano (21 de junio), el Sol alcanza su altura más alta en 12 horas solares, declinación $+ 23^{\circ} 27'$. Durante los equinoccios, el 21 de septiembre y el 21 de marzo, el Sol está en el ecuador celeste (ángulo 0°), el cual es la normal (ángulo perpendicular) al ángulo de la latitud de la ubicación, por ejemplo 19° en la Ciudad de México.

Otra variable celeste está representada por la latitud, que es la coordenada geográfica igual al ángulo formado por el polo norte celeste (punto de intersección entre el eje de rotación de la Tierra y la esfera celeste) en el horizonte, que corresponde al ángulo que el cenit de la Tierra se forma con el plano ecuatorial.

El conocimiento de la latitud de un sitio y del día del año, o mejor, la inclinación solar de un determinado día del año, nos permiten determinar la cantidad de radiación solar en el sitio del proyecto.

De esta forma podemos conocer el camino que los rayos del sol deben alcanzar para llegar al lugar del proyecto. Cuando ocurre el cenit, los rayos solares incidirán perpendicularmente en una superficie completamente horizontal con respecto al plano terrestre; en el mes de diciembre la dirección de los rayos será de 45° aproximadamente, en el caso de la Ciudad de México, a la superficie vertical orientada al sur cursando un trayecto más largo perdiendo una buena parte de la energía que transporta.

Por lo tanto, la latitud es el parámetro que más contribuye a definir la relación entre un área de un proyecto y el sol. Sin embargo, esto no es suficiente para definir la cantidad de energía absorbida de una superficie. Es necesario conocer la orientación de la misma superficie. De hecho, es el ángulo de incidencia con la superficie de los rayos solares, que debido a la gran distancia entre la tierra y el sol se puede considerar un conjunto de líneas paralelas, para determinar la cantidad de energía incidente. Además, la atmósfera que deben atravesar los rayos del sol aumenta con la latitud creciente, por lo tanto, reduce la cantidad de radiación solar que llega al suelo.

El ángulo de incidencia es, por lo tanto, el ángulo con el que se forman los rayos del sol con una línea perpendicular a una superficie dada, determinando así el porcentaje de radiación directa interceptada por él; Mazria (1979) determinó la pérdida de radiación cuando el ángulo de incidencia varía, mostrando que en un intervalo de 20° las pérdidas son bastante limitadas, del orden del 6%, mientras que tienden a aumentar en un 6% cada 5° gradualmente acercándose a la normal.

La irradiancia, medida en W / m^2 , representa el flujo instantáneo de energía radiante que afecta a una superficie unitaria. El ángulo de incidencia de los rayos del sol influye en la irradiancia recibida que se calcula como el producto entre la irradiancia perpendicular y el coseno del ángulo de incidencia. (Ver Figura 8)

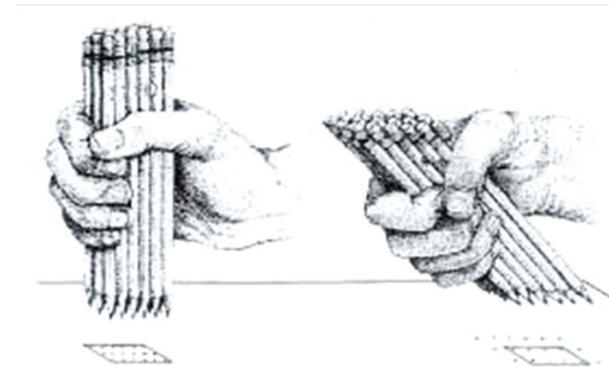


Figura 8. Representación de la incidencia solar en una superficie. (Pollo, 2015).

De estas consideraciones deriva la importancia de la inclinación de la superficie de referencia. En nuestra latitud, una superficie horizontal recibe mucha más energía durante los meses de verano, mientras que una superficie vertical orientada al sur se ve favorecida en el periodo de invierno; para obtener resultados satisfactorios durante todo el año, la superficie debe disponerse según un ángulo que media los valores de los ángulos de incidencia de las diferentes estaciones. Este criterio se puede usar, por ejemplo, para un panel solar; en comparación al plano horizontal, una superficie orientada al sur debe tener valores iguales a la latitud de sitio y puede variar, como hemos visto, de $+ - 23^{\circ}$. Otra característica de la radiación solar recibida de una superficie es la orientación, es decir, su disposición con respecto a los puntos cardinales. La gráfica se refiere a la orientación de diferentes superficies y detecta la cantidad de energía recibida de las superficies verticales orientados de manera diferente durante todo el curso del año en una latitud dada, en el caso específico es 19° norte, Ciudad de México.

Es interesante observar cómo, mientras que en la superficie horizontal se recibe la radiación máxima en verano, en las superficies verticales hay una variación notable en el comportamiento en las diferentes estaciones. La superficie vertical orientada al sur, que podemos identificar con un muro que delimita nuestro espacio, recibe la máxima contribución de energía en los meses de invierno. Las paredes orientadas al este y al oeste, por otro lado, se comportan como la superficie horizontal, capturando la energía máxima en los meses de verano. (Ver Figura 9)

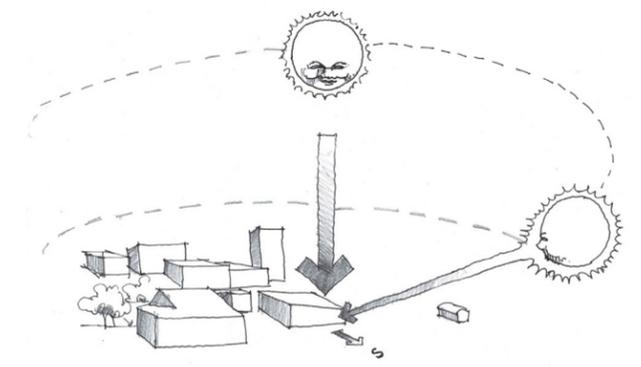


Figura 9. Representación del ángulo de incidencia solar durante el día. (Pollo, 2015).

Teniendo en cuenta las necesidades energéticas de los asentamientos humanos, que son de calor en los meses de invierno, el llamado período de calefacción y enfriamiento en los meses de verano, las paredes verticales pueden funcionar, sobre todo en las partes acristaladas, como sistemas de captura de energía en invierno y como protección en el verano, especialmente cuando se considera junto con los elementos de sombra.

La mayor parte de la radiación solar, de hecho, es interceptada de la atmósfera, por lo que es necesario conocer la meteorología local para comprender algunos fenómenos a escala micro-climática.

Un sitio caracterizado por un micro-clima muy nublado, por ejemplo, dará como resultado un porcentaje de radiación directa más pequeño y generalizado que un sitio donde predominan los días de clima despejado, o la cantidad de contaminación del aire reducirá la radiación directa disponible.

Para determinar la incidencia de estos fenómenos, debemos consultar los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas cercanas. Sin embargo, los puntos de detección de variables tales como la temperatura del aire, la humedad relativa, el heliofanismo, la velocidad del aire, pueden verse influenciados por condiciones específicas o ubicarse en lugares específicos que no describen completamente el área en la que se encuentran. Por esta razón, es necesario considerar elementos tales como la presencia de construcciones u otros obstáculos a la circulación de aire y de la radiación, la aspereza considerada, la presencia de espejos de agua, la diferente disposición del

sitio con respecto a las salidas de valles o relieves. En áreas urbanas, por ejemplo, generalmente tendremos valores de temperatura más altos que los que se encuentran en áreas abiertas y velocidades de aire más bajas.

Una montaña cercana, o incluso una pequeña colina, puede sombrear nuestro sitio durante muchas horas al día, anulando cualquier posibilidad de explotar la energía solar o una pista de nieve cubierta pueden aumentar la cantidad de energía disponible a través de efectos de reflexión oportunas.

La orografía, como se puede observar en los asentamientos históricos, siempre ha influido en las decisiones de asentamiento. Casi nunca se observan núcleos habitados ubicados en laderas expuestas al norte. Esta elección se deriva de la observación empírica del camino del sol y la importancia de disfrutar de su energía.

Finalmente, la densidad urbana varía mucho de un sitio a otro, por lo que durante el diseño, la forma y la geometría del área habitada deben ser monitoreadas para maximizar los efectos del blindaje o apertura hacia el sol controlando la distancia entre edificios, la conciencia de la importancia del sol es fundamental al pensar en los conceptos de enfoque bioclimático y ahorro de energía. (Pollo, 2015)

El conocimiento de las variables que influyen en la cantidad de energía que irradia un área, es necesario pero no suficiente para diseñar de acuerdo con el enfoque bioclimático, ocurre entonces que se tienen otras herramientas que aprovechan la importancia del componente solar en el proyecto.

En primer lugar, es oportuno, una vez entendida la dinámica astronómica fundamental, y para facilitar la comprensión, referirnos, en nuestras consideraciones, al camino solar aparente. Representa el camino del sol a lo largo de la bóveda celeste durante el año, colocándonos en un punto de observación ubicado en el suelo.

En esta interpretación, el sitio del proyecto se ubica en el centro del sistema de referencia cartesiano orientado hacia el norte y el sol se mueve sobre él describiendo curvas que parten del este al amanecer (noroeste en verano y sur-este en invierno).

La ruta aparente varía de acuerdo con los factores celestes que hemos analizado anteriormente arriba, según la latitud en la que nos encontremos.

Para determinar la posición del sol, tenemos dos cantidades fundamentales disponibles: azimut y altura solar. Estas son

las coordenadas con las que es posible identificar la posición del sol en relación con el sitio del proyecto en una hora del día de un mes preciso. Estas cantidades son atribuibles a la incidencia y orientación de las que hablamos anteriormente.

El azimut es el ángulo medido entre las dos líneas identificadas por la proyección de los rayos solares en el plano horizontal (360°) y el eje norte-sur. La altura solar es el ángulo medido entre las dos líneas identificadas por la dirección de los rayos solares y su proyección en el plano horizontal (90° desde sur al centro, el cenit).

Estos dos valores están disponibles en diagramas solares, mapas que describen la trayectoria aparente del sol y nos permiten identificar fácilmente las coordenadas del sol en cualquier época del año. Naturalmente, cada latitud corresponde a una gráfica solar diferente, que depende de la ubicación. Los diagramas pueden ser polares, cuando la Tierra se representa en una superficie horizontal, o vertical, cuando la superficie de representación es simplemente vertical; en ambos casos, en el cuadro se informan siete arcos (uno para junio, uno para diciembre y uno para cada dos meses) que representan el movimiento del sol durante el día y las líneas que representan las horas del día. La intersección entre los dos representa un momento determinado del año al que se asocian un azimut y una altura solar. Si tomamos por ejemplo un diagrama polar solar, vamos a leer el valor de azimut en las líneas que convergen en el centro y el valor de la altura solar en circunferencias con céntricas. (Ver Figura 10)

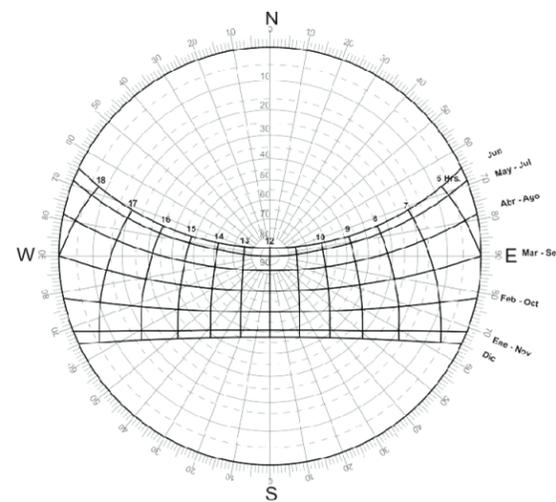


Figura 10. Gráfica solar estereográfica para la latitud 19° N, Ciudad de México. (Azpeitia, 2015).

Conocer la posición del sol en un momento dado es

fundamental para conocer las condiciones en las que se encontrará el entorno habitado, ya sea un edificio, un espacio abierto, un cuadrado, una calle o un parque sujetos a la sombra de edificios adyacentes. En ambos casos la primera evaluación que se realizará es la relativa al movimiento de las sombras y luego a la presencia de irradiación solar en las superficies, planas o verticales, que queremos estudiar. El tipo de preguntas, a las que estas observaciones nos permiten responder, son la cantidad de energía que podemos capturar con una pared acristalada de nuestro edificio, la posibilidad de explotar un panel solar térmico o estimar la comodidad de verano de un espacio abierto .

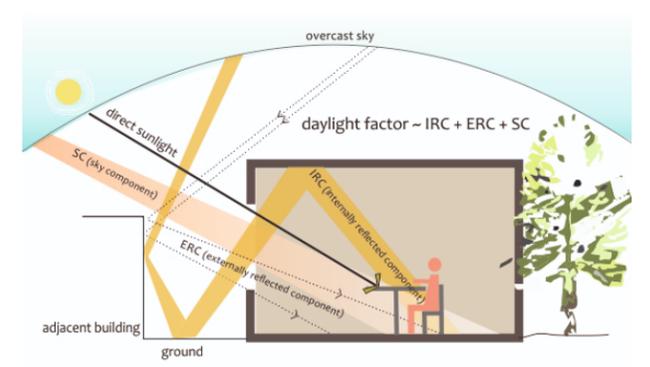


Figura 11. Representación Gráfica del Factor de luz Diurna. (<https://nzebnew.pivotaldesign.biz/knowledge-centre/passive-design/daylighting/>).

3 | 4.3 TECNOLOGÍAS SOLARES PASIVAS

Las tecnologías solares pasivas son aquellas que no usan dispositivos mecánicos para mover fluidos. En el diseño del edificio, el uso del calor gratuito proporcionado por el sol es posible gracias a la creación de sistemas especiales que permiten la captura de la radiación solar y la acumulan en forma de calor. Las tecnologías pasivas se dividen en dos categorías: aquellas con ganancia directa y aquellas con ganancia indirecta, ambas se unen por la presencia de un elemento captador, generalmente el vidrio de las superficies acristaladas, y por la presencia de elementos capaces de acumular el calor y liberarlo en el tiempo , como para superar el problema temporal que se deriva del uso de un recurso necesario cuando la fuente primaria, constituida por el sol, parece estar ausente.

Las tecnologías solares pasivas se pueden distinguir en ganancia directa, ganancia indirecta y tecnologías mixtas. El término ganancia directa indica que la energía solar penetra directamente en las habitaciones a calentar, irradiando y que la acumulación es un elemento presente en el ambiente (el piso o las paredes expuestas a la luz solar). El sistema de protección directa más común es la ventana orientada al sur, libre de obstrucciones y dispuesta correctamente para permitir que la mayor cantidad de radiación solar penetre en las habitaciones.

Para el correcto funcionamiento del sistema, la capacidad de aislamiento de la envolvente o la masa térmica es extremadamente importante, para limitar las pérdidas térmicas, y el uso de dispositivos de protección solar

3 | 4.2 FACTOR DE LUZ DIURNA

El factor de luz diurna es una medida de la iluminancia interna en relación con la iluminancia externa sin obstrucciones en condiciones estándar de cielo cubierto CIE y se expresa como un porcentaje. Es una medida común que permite determinar la disponibilidad de luz natural en una habitación.

El factor de luz diurna generalmente se mide en un plano de trabajo donde es probable que se lleven a cabo tareas visuales, a menudo a 0,7-0,8 m sobre el suelo, lo que corresponde a un escritorio de oficina o escuela. Cuanto mayor sea el Factor de Luz diurno (FDL), más luz del día estará disponible en la habitación.

Si el FDL es <2%: la habitación se ve sombría, Se necesita iluminación eléctrica la mayor parte del día.

Si el FDL es 2-5%: la habitación tiene apariencia de luz diurna. En ocasiones se requiere iluminación artificial.

Si el FDL es >5 %: la habitación tiene una fuerte apariencia de luz diurna. Rara vez se necesita iluminación eléctrica. (Beningfield, J. et at, 2018)

Los valores del factor de luz diurna pueden variar según la zona geográfica dependiendo de las necesidades de los requerimientos de luz natural del ser humano de la población dentro de región o área en el mundo. (Ver Figura 11)

para evitar el recalentamiento de las habitaciones durante el verano; elementos adicionales para mejorar las presentaciones del sistema son sistemas aislantes de oscurecimiento que se activarán durante las noches de invierno para limitar las dispersiones debido a las propiedades pobres de las superficies acristaladas.

(Ver Figura 12)

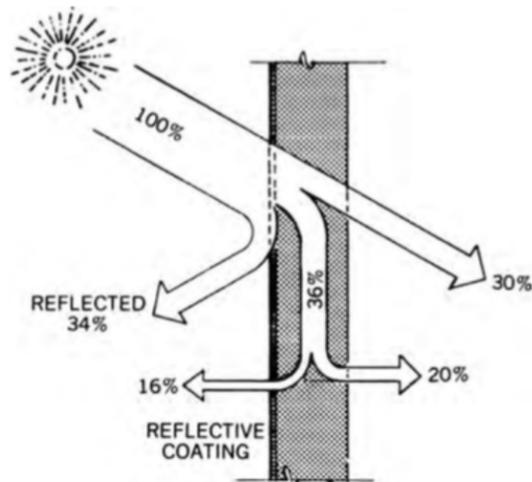


Figura 12. Representación de la incidencia solar en superficies acristaladas. (Lechner, 2015).

En los sistemas de ganancia indirecta, la radiación solar no ingresa directamente en la habitación a calentar, sino que se acumula mediante un elemento opaco del recinto que transmite la energía térmica al medio ambiente; estos son sistemas más complejos en los que el elemento de acumulación juega un papel dominante. Son las características físicas del material que lo componen para determinar la cantidad y el momento de la transmisión de energía dentro de las instalaciones.

El sistema más simple con ganancia indirecta está representado por la pared sólida de material homogéneo que, mirando hacia el sur, se convierte en un diafragma entre las habitaciones interiores y el ambiente externo, un verdadero vínculo entre las condiciones climáticas de un sitio y el necesidades térmicas de un lugar habitado.

Un muro macizo caracterizado por una gran inercia térmica es capaz de acumular el calor proveniente del sol en los días de invierno y transmitirlo en el momento en que lo requieran los locales habitados, lo que explica el principio de bioclimática según el cual el edificio no es un sistema cerrado en sí mismo sino en relación continua con el ambiente externo.

Una tecnología de mejora de la pared masiva está representada por la pared Trombe-Michel que ve la introducción de un vidrio en el lado exterior de la pared, ahora pintado de negro para aumentar la capacidad de absorción de la pared, 5-10 cm de separación.

En esta cavidad, el aire se calienta y, a través de los agujeros de aireación en la pared masiva, penetra en la habitación trasera, al mismo tiempo que la pared se calienta e irradia el calor dentro de la casa, también este sistema requiere protección solar adecuada para evitar el sobrecalentamiento del verano.

Un sistema atípico está representado por el invernadero, dependiendo del tipo, puede ser de ganancia directa o indirecta, y que difiere como un espacio de vida real, no como un simple elemento tecnológico.

Para una descripción completa del sistema de invernadero solar, es útil comprender que se trata de un espacio orientado hacia el sur, delimitado por algunas superficies acristaladas, de una sola cuando está empotrada, hasta cuatro cuando se coloca contra ella. El vidrio actúa como un elemento de captura y la radiación solar calienta directamente un primer entorno que funciona como el espacio intermedio de un colector solar. El aire caliente, de hecho, circula en los entornos vecinos que pueden ser delimitados por una ventana, en estos casos se obtiene una ganancia directa, o de una pared, con una ganancia indirecta. El papel del acumulador puede ser jugado por el piso del invernadero y / o por la pared vertical expuesta a los rayos del sol. También en este caso, las dispersiones invernal pueden controlarse mediante cortinas aislantes, ya que el sobrecalentamiento del verano puede prevenirse mediante sistemas de blindaje especiales y mediante sistemas de ventilación y apertura; sin embargo, debe enfatizarse que durante el invierno el invernadero tiene la ventaja de ser un espacio intermedio entre las áreas habitadas y el ambiente externo.

Al ser un entorno habitado, el invernadero, más que otras tecnologías pasivas, tiene la desventaja de tener que ser utilizado correctamente por el usuario final, que debe comprender cuál es el funcionamiento correcto de este elemento para no anular el diseño.

Las tecnologías solares pasivas no sirven solamente para ayudarnos a regular la temperatura interna de las edificaciones por medio de la radiación infrarroja, de igual

manera nos sirven para regular la entrada de luz y de radiación UV. Así que es importante considerar los sistemas de control de radiación para su elección dependiendo de la cantidad de luz, calor y rayos UV que se requiera dependiendo del comportamiento de los factores físicos que intervienen en el ambiente durante días y horas específicas de un lugar durante el año.

Tenemos que considerar el uso de un sistema de control de radiación dependiendo del problema que se presente, si el problema es solamente lumínico, es decir, si hay poca o demasiada iluminación dentro de un espacio sin la presencia de temperaturas que se encuentren fuera del rango de confort (20 - 25°C aproximadamente) o si el problema es puramente térmico, existe la presencia de una luz adecuada para un espacio pero las temperaturas se encuentran muy bajas o muy altas.

Incluso hay casos donde se presentan ambos problemas: temperaturas fuera del rango de confort y exceso o falta de iluminación natural.

Dependiendo de este análisis se puede llegar a la elección de un sistema o de un dispositivo de control de radiación óptimo dependiendo de sus propiedades térmicas o lumínicas para un caso específico.

REFERENCIAS

Pollo, R. (2015). *Progettare l'ambiente urbano: Riflessioni e strumenti*. Roma: Carocci editore S.p.A. Studio Agostini.

Lechner, N., (2015) *Heating, Cooling, Lighting, Sustainable Design Methods for architects*. New Jersey: John Wiley & Sons.

3 | 5 SISTEMAS DE CONTROL DE RADIACIÓN SOLAR

El sistema de calentamiento pasivo o sistema de control de radiación funciona a través del sol, la cual trabaja de manera más intensa durante el verano porque hay más cantidad de radiación que llega a la superficie proveniente del sol con temperaturas más altas.

El sombreado es requerido para prevenir el calentamiento solar pasivo en el verano para evitar el sobre calentamiento de las superficies. El sombreado es una de las estrategias

más importantes en la sustentabilidad porque casi todos los edificios en el mundo se sobre calientan en el verano y la respuesta más común es el uso de aires acondicionados provocando la quema de restos fósiles y la emisión excesiva de CO₂.

El sombreado es una estrategia solar a pesar de que bloquea en lugar de recoger la radiación solar. Para ser eficaz, el sombreado requiere una mejor comprensión de la geometría solar que cualquiera de las otras estrategias solares de energía solar pasiva, solar activa, fotovoltaica y luz natural.

TRAGALUCES

Por ejemplo, a una latitud de 42 grados (hemisferio norte) en la superficie terrestre, un tragaluz (acristalamiento horizontal) recoge más radiación solar que una ventana sur. Claramente, entonces, los tragaluces necesitan sombreado muy eficaz o, mejor aún, deben ser evitados. El acristalamiento del este o del oeste recoge más radiación solar que las ventanas del lado sur. (Ver Figura 13)



Figura 13. Imagen del tragaluz del Museo Guggenheim diseñado por el Arq. Frank Lloyd Wright, Nueva York. (<https://lavamagazine.com/museo-solomon-r-guggenheim/>)

Por lo tanto, el sombreado de las ventanas este y oeste son más importantes que el sombreado de las ventanas del sur. La orientación sur en el hemisferio norte tiene más ganancias de calor durante el invierno que cualquier otra orientación, la cual es útil para evitar la pérdida de calor cuando se presentan temperaturas más bajas con respecto al rango de confort (Lechner, 2015).

La carga solar total se compone de tres componentes: radiación directa, difusa y reflejada. Para evitar el calentamiento solar pasivo cuando no se desea, siempre hay que sombrear una ventana del componente solar directo y, a menudo, también del cielo difuso y de los componentes reflejados. En regiones húmedas soleadas como el Sudeste, la radiación difusa del cielo puede ser muy significativa.

Las zonas soleadas con mucho polvo o contaminación también pueden crear radiación muy difusa. La radiación reflejada, por otra parte, es a menudo un gran problema en áreas como el suroeste, donde la luz solar intensa y las superficies de alta reflectancia a menudo coexisten. El problema también ocurre en las zonas urbanas, donde las superficies altamente reflectantes son bastante comunes. Hay casos donde la fachada norte de un edificio experimenta la carga solar de una orientación sur porque un edificio grande con acristalamiento reflectante fue construido hacia el norte.

La vegetación es muy útil para mantener los espacios exteriores frescos, ya que la sombra y la humedad que proporcionan puede generar un "micro-clima" más confortable. Un micro-clima es una área determinada donde existen condiciones de temperatura y humedad diferentes al clima predominante en una zona, puede ser causada por vegetación o por un edificio o barrera que proporcione sombra y que pueda bloquear o dirigir los vientos dominantes.

Los árboles pueden ser utilizados en el diseño para dirigir o bloquear los vientos dominantes dependiendo de su ubicación con respecto a los vientos dominantes, si se quiere

dirigir el viento entonces los árboles o la vegetación se colocan alineados de manera paralela al viento y si se quieren bloquear se colocan alineados de manera perpendicular.

La vegetación tiene muchas formas que nos pueden ayudar en el diseño, hay formas cónicas, en forma de paraguas (parabólicos), circulares, irregulares o verticales como los cedros, los cuales, generalmente, se ocupan en el diseño para dirigir o bloquear los vientos. En ciudades donde hay demasiada ganancia de calor en las calles, una solución para mejorar las condiciones de temperatura exterior es mediante árboles con formas que generen más superficie de sombra como los árboles con formas parabólicas usados en banquetas y camellones.

La vegetación tiene otra característica particular que nos ayuda en el diseño ambiental; en la naturaleza se encuentra vegetación de tipo perenne y caducifolia. Perenne quiere decir que la vegetación siempre se encuentra con fronda, durante todo el año tiene hojas, mientras que la vegetación caducifolia es frondosa en ciertas épocas (primavera, verano usualmente). La vegetación perenne es muy útil en zonas con climas cálidos constantes, donde se necesita sombra durante todo el año. La vegetación caducifolia es muy útil en zonas con estaciones muy marcadas donde se presentan temperaturas altas y bajas con respecto al rango de confort durante el año, ya que la vegetación en primavera y verano es frondosa y genera sombra, regulando la ganancia de radiación pero durante otoño e invierno al no tener hojas en sus ramas, permite el paso a la radiación para la ganancia de energía en caso de ser necesario. (Ver Figura 14)

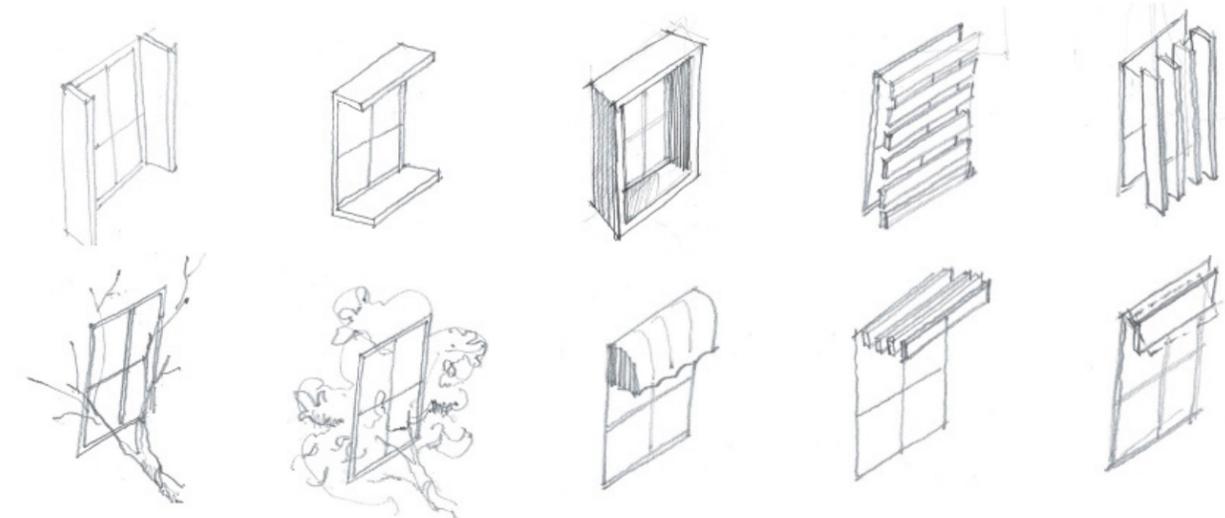


Figura 14. Ejemplos de elementos arquitectónicos de sombreado estáticos & Vegetación. Elaborado por el autor.

También la vegetación puede ser utilizada como barrera acústica si se encuentra alineada de manera perpendicular a las ondas de sonido. Entonces, podemos concluir que la vegetación en el diseño es muy importante para el diseño ambiental sostenible, ya que tiene la capacidad de regular las condiciones de iluminación, acústicas y térmicas de manera natural. (Pollo, 2015).

3 | 5.1

ELEMENTOS DE SOMBREADO

Dependiendo de la orientación se debe de ocupar un tipo o varios tipos de dispositivos de sombreado. Para la zona del hemisferio norte la radiación solar proviene del sur mientras que en el hemisferio sur proviene en su mayoría del norte. En estos casos la incidencia de la radiación proviene de arriba, así que se usa regularmente un volado o un techo (elementos horizontales) que evita la transferencia excesiva de radiación (calor y luz) por medio de los elementos transparentes expuestos. Durante el este u oeste la radiación proviene en su mayoría lateralmente por lo tanto se usan elementos como aleros o parasoles (elementos verticales) para evitar la transmisión excesiva de radiación (calor y luz) al interior.

Actualmente hay materiales inteligentes en elementos como ventanas o superficies transparentes que pueden sustituir los dispositivos de sombreado por medio de diversos sistemas constructivos. (Ver Figura 15)

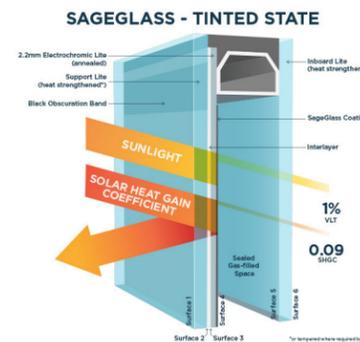


Figura 15. Capas de un vidrio electrocrómico para fachadas SageGlass. (<https://www.sageglass.com/en/article/what-electrochromic-glass>)

Debido a que la vista es una de las prioridades más alta para la mayoría de las ventanas, un volado o un techo grande suele ser la mejor opción. Aunque obstruye el cielo alto, la vista horizontal permanece.

Son todas las variaciones de la proyección horizontal, la aleta vertical, o la cáscara de huevo, que es una combinación de los dos primeros. Las aletas pueden ser anguladas para el control solar adicional. Casi un número infinito de variaciones son posibles, como puede verse al observar obras de arquitectos como Le Corbusier, Oscar Niemeyer, Richard Neutra, Paul Rudolph y E. D. Stone. Para ejemplos del trabajo de estos y muchos otros arquitectos, el autor recomienda el libro Solar Control and Shading Devices, de Olgay y Olgay. (Lechner, 2015)

Los dispositivos de sombreado estáticos son muy comunes como estrategia de sombreado debido a su simplicidad, bajo costo y bajo mantenimiento. (Ver Figura 16)

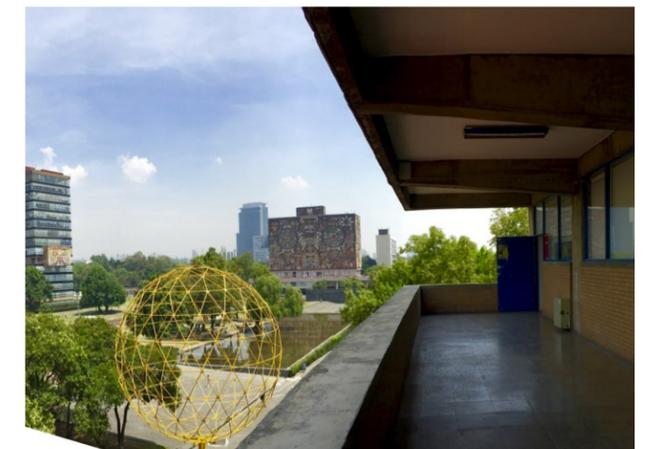


Figura 16. Fotografía del pasillo del edificio principal de la Facultad de Arquitectura, UNAM. (<https://arquitectura.unam.mx/tlb.html>)

Según el libro "Daylight in Buildings" Los parámetros clave a considerar al elegir un sistema son:

Las condiciones de iluminación natural del sitio: latitud, nubosidad y obstrucciones. Los objetivos de la luz natural. Estrategias de iluminación natural implicadas en el diseño arquitectónico. Esquema de ventana y su función. Reducción de energía y pico de energía. Uso de sistemas dinámicos (manuales o mecánicos) - estáticos (fijos). Si es dinámica debe considerarse el mantenimiento. Restricciones de integración arquitectónica / construcción. Restricciones económicas. Es importante enfocarse en los principales objetivos para aplicar los sistemas de iluminación natural; los cual son: La capacidad de redirigir la luz del día a zonas poco iluminadas, mejorar la iluminación natural para la iluminación de tareas, mejorar la comodidad visual, control del deslumbramiento solar y el control térmico.

Existen distintos tipos de sistemas de iluminación natural, por ejemplo, los sistemas de iluminación natural con sombreado, los cuales son sistemas que se basan principalmente en tragaluces difusos que rechazan la luz solar directa, y sistemas que utilizan principalmente la luz solar directa, enviándola al techo o a lugares por encima de la altura de los ojos.

Los sistemas de sombreado están diseñados para sombreado solar y luz natural; también pueden abordar otros problemas de iluminación natural, como la protección contra el deslumbramiento y la re dirección de la luz diurna directa o difusa. El uso de sistemas de sombreado solar convencionales, como los tonos desplegables, a menudo reduce significativamente la admisión de luz natural a una habitación. Para aumentar la luz del día y proporcionar sombreado, se han desarrollado sistemas avanzados que protegen el área cercana a la ventana de la luz solar directa y envían luz diurna directa y / o difusa al interior de la habitación.

Los sistemas de iluminación natural sin sombreado están diseñados principalmente para redirigir la luz del día a áreas alejadas de una ventana o abertura del tragaluz. Pueden o no bloquear la luz solar directa. Estos sistemas se pueden dividir en cuatro categorías:

Los sistemas difusos de guía de luz redirigen la luz del día desde áreas específicas de la bóveda celeste al interior de la habitación. Bajo condiciones de cielo nublado, el área alrededor del cenit del cielo es mucho más brillante que el área cercana al horizonte. Para sitios con obstrucciones externas altas (típicas en entornos urbanos densos), la parte superior del cielo puede ser la única fuente de luz natural. Los sistemas de guía de luz pueden mejorar la utilización de la luz del día en estas situaciones.

Los sistemas de guía de luz directa envían la luz solar directa al interior de la habitación sin los efectos secundarios del resplandor y el sobrecalentamiento.

Los sistemas de dispersión de luz o difusión se utilizan en tragaluces para producir una distribución uniforme de la luz del día. Si estos sistemas se usan en aberturas de ventanas verticales, se producirá un deslumbramiento serio.

Los sistemas de transporte ligero recogen y transportan la luz solar a largas distancias hasta el núcleo de un edificio a través de fibra óptica o tubos de luz.

A continuación se mencionan algunos elementos de sombreado ejemplificados en el libro que ha creado la Agencia

Internacional de Energía donde se resalta la definición del elemento, sus componentes, su localización en la edificación, barreras técnicas (desventajas) y sus aplicaciones.

Dentro de los ejemplos se encuentran elementos convencionales (tradicionales) y no convencionales, dinámicos (manuales) o estáticos (fijos). Cada elemento se ha sometido a prueba para evaluar su desempeño bajo ciertas condiciones variables que podrían afectar el funcionamiento del sistema tales como el clima, ubicación, obstrucciones, ángulo de incidencia solar, etc.

El objetivo del análisis de los elementos de sombreado es para probar su desempeño en cuanto a la protección del deslumbramiento, la vista al exterior, si la luz puede ser guiada a profundidades que rebasan los parámetros convencionales, si la luz es homogénea, ahorro energético (disminución del uso de luz artificial), la necesidad de ajustes pasivos o activos que rastreen el movimiento del sol para su funcionamiento eficiente y disponibilidad comercial de cada elemento.

ESTANTE DE LUZ

Un estante ligero es un sistema convencional, usado por los faraones egipcios, generalmente se conforma por un reflector horizontal o casi horizontal colocado dentro y / o fuera de la fachada de la ventana. El estante de luz puede ser una parte integral de la fachada o montado en el edificio. El estante de luz está diseñado para sombrear y reflejar la luz en su superficie superior y para proteger el brillo directo del cielo.

Un estante liviano generalmente se coloca encima del nivel del ojo. Divide una ventana en un área de vista debajo y un área de claristorios arriba. Los estantes de luz a veces emplean sistemas ópticos avanzados para redirigir la luz a las áreas profundas del interior del edificio. El estante de luz generalmente se coloca para evitar el deslumbramiento y mantener la vista afuera; su ubicación será dictada por la configuración de la sala, la altura del techo y el nivel de la vista de una persona que se encuentre en el espacio. En general, cuanto menor es la altura del estante de luz, mayor es el deslumbramiento y la cantidad de luz reflejada en el techo. (Ver Figura 17)



Figura 17. Representación de un Estante de Luz en una Fachada. (https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Light_shelf)

Por otra parte, un estante de luz interno, que redirige y refleja la luz, reducirá la cantidad de luz recibida en el interior en relación con una ventana convencional. Tanto las mediciones a escala real como a escala han demostrado que las ventanas con estantes de luz internos producen un factor de luz diurna globalmente reducido en el plano de trabajo en todo el espacio interior en comparación con una ventana sin sombra del mismo tamaño. En algunos casos, el uso de un estante ligero externo permite aumentar la cantidad total de luz diurna en comparación con la proporcionada por las ventanas tradicionales. Un estante de luz externo aumenta la exposición al área de alta luminancia cerca del cenit del cielo. Dependiendo de la geometría del estante de luz, la luz diurna disponible se distribuirá de manera más uniforme mediante un estante de luz externo en comparación con una ventana sin sombra del mismo tamaño.

Los estantes de luz afectan el diseño arquitectónico y estructural de un edificio y deben considerarse al comienzo de la fase de diseño, ya que requieren un techo relativamente alto para funcionar de manera efectiva. Los estantes de luz deben diseñarse específicamente para cada orientación de ventana, configuración de sala y latitud. Se pueden aplicar en climas con mucha luz solar directa y son aplicables en espacios profundos con orientación sur en el hemisferio norte (orientación norte en el hemisferio sur). Los estantes de luz no funcionan tan bien en las orientaciones este y oeste y en los climas dominados por las condiciones del cielo nublado (Letchner, 2015).

LOUVERS Y PERSIANAS

Las persianas y louvers son sistemas clásicos de iluminación natural que se pueden aplicar para sombrear el sol, proteger contra el deslumbramiento y redirigir la luz del día. Las persianas y los louvers se componen de múltiples lamas horizontales, verticales o inclinadas. Existen varios tipos de sistemas de louvers y persianas, algunos de los cuales utilizan formas y acabados de superficie muy sofisticados. Dependiendo del ángulo de lamas, las persianas y los louvers obstruyen parcial o completamente la vista direccional hacia el exterior. La percepción de la vista de un ocupante a veces puede verse obstaculizada por la estructura a pequeña escala de los listones, lo que genera confusión visual cuando el ojo ordena la vista desde la persiana. Muchas persianas y louvers están diseñadas, por lo tanto, para replegarse total o parcialmente.

Por otra parte, en condiciones soleadas, las persianas pueden producir líneas extremadamente brillantes a lo largo de las tablillas, causando problemas de deslumbramiento. Con persianas en un ángulo horizontal, tanto la luz directa del sol como la claraboya difusa pueden aumentar el resplandor de las ventanas debido al aumento del contraste de luminancia entre las lamas y las superficies adyacentes. Inclinarse hacia arriba aumenta el resplandor y la visibilidad del cielo; inclinarse hacia abajo proporciona sombreado y reduce los problemas de deslumbramiento. Las persianas brillantes y reflectantes pueden generar problemas adicionales de deslumbramiento debido a que el sol y la claraboya se pueden reflejar directamente desde la superficie de la lama al campo de visión. Algunos de estos problemas pueden reducirse mediante el uso de una superficie difusa de lamas. Además los louvers y las persianas no permiten siempre una vista hacia el exterior. Las persianas o louvers se pueden ubicar en el exterior o el interior de cualquier ventana o tragaluz, o entre dos paneles de vidrio. Los louvers generalmente están situadas en el exterior de la fachada; las persianas caben dentro o entre el acristalamiento.

Las persianas y louvers se pueden usar en todas las orientaciones y en todas las latitudes y se pueden agregar a un sistema de ventana siempre que sea necesario. Los louvers exteriores afectan el diseño arquitectónico y estructural de un edificio; las persianas interiores tienen menos impacto. En la práctica, las persianas y louvers horizontales se usan

generalmente en todas las orientaciones de edificios, y las persianas verticales se usan predominantemente en ventanas orientadas al este y al oeste. (Ver Figura 18)



Figura 18. Fotografía de los louvers en la Fachada Oeste del edificio de Posgrado en la UNAM. (Larainne, 2015)

PANELES PRISMÁTICOS

Los paneles prismáticos son dispositivos delgados, planos, de diente de sierra hechos de acrílico transparente que se usan en climas templados para redirigir o refractar la luz del día. Cuando se usan como un sistema de sombreado, refractan la luz directa del sol pero transmiten luz cenital difusa. Se pueden aplicar de muchas maneras diferentes, en arreglos fijos o de rastreo solar, en fachadas y tragaluces. Los paneles prismáticos se utilizan en configuraciones fijas y móviles. Dependiendo de la estrategia de iluminación natural que se utilice, pueden colocarse en el panel de la ventana (configuración fija) en el lado exterior y / o interior. Los paneles ofrecen una vista transparente pero distorsionada hacia el exterior. Por lo general, se necesitará una ventana de vista adicional a menos que el panel se pueda abrir para permitir una vista.

Los paneles prismáticos tienen dos funciones muy diferentes; por sombreado solar y por re-dirección de la luz del día. Su ubicación en relación con la fachada o el techo es muy dependiente de la aplicación específica.

Si los paneles prismáticos se utilizan como dispositivos de

protección solar en una configuración fija, se necesitan componentes adicionales para evitar la dispersión del color. Estos podrían incluir, por ejemplo, una lámina de vidrio grabada (ligeramente difusa) detrás del sistema.

Si se utiliza para redirigir la luz solar, los diseños prismáticos del panel actualmente disponibles pueden redirigir un poco de luz solar hacia abajo, causando deslumbramiento. El alto coeficiente de expansión de los paneles generalmente requiere que estén diseñados para permitir la expansión térmica. Desde las quemaduras acrílicas, las regulaciones contra incendios deben verificarse cuando se utilizan paneles prismáticos. La mayor desventaja de los paneles prismáticos es el costo, ya que su producción requiere mucha precisión. (Ver Figura 19)



Figura 19. Representación de un Panel Prismático en una Fachada. (Luible, 2015)

TECHUMBRES (SOMBREADOS) GUIADORAS DE LUZ

Un sombreado que guía la luz es un sistema de sombreado externo que redirige la luz del sol y la luz del cielo hacia el techo. El elemento consiste en una abertura de vidrio que se difunde y dos reflectores diseñados para dirigir la luz difusa desde la abertura a un edificio en ángulos dentro de un rango angular especificado. Por lo general, el rango angular de distribución de la luz en el edificio está diseñado para extenderse desde la horizontal hasta una elevación de aproximadamente 60 °. La elevación más baja se establece en cero u horizontal para evitar el deslumbramiento.

Las techumbres se instalan sobre la tercera o la mitad superior de un sistema de ventana. Las persianas tienen paneles laterales verticales para soporte y sombreado adicional.

La principal desventaja del sistema es que cuestan más que las techumbres convencionales, principalmente debido al

costo de la lámina de metal de alta reflectancia a partir de la cual se fabrica la techumbre guiadora de luz y el requisito del material reflectante es que se forme con precisión para limitar la propagación de la luz de salida. Un problema observado es que las techumbres tienden a derramar agua. Este problema generalmente se puede corregir con pequeños orificios de drenaje.

Este sistema si se usa correctamente, puede evitar el deslumbramiento y dirigir la luz hacia lo profundo de una habitación, es posible mejorar la iluminación diurna de la habitación al tiempo que protege la luz solar directa; el cual es el objetivo principal del sistema.

Las techumbres que guían la luz se pueden usar en cualquier edificio que use sombreado externo de ventanas. Toda la luz del día que ingresa a través de la cortina que guía la luz se dirige hacia el techo pero la luz puede convertirse en una fuente de deslumbramiento si se usa pintura brillante. Por lo general, un techo pintado en blanco plano evita los problemas de deslumbramiento.

Debido a que la luz es dirigida al techo, la sombra es una fuente de luz difusa, que no es luminosa cuando es vista por los ocupantes de la habitación y, por lo tanto, está completamente libre de deslumbramiento. (Ver Figura 20)



Figura 20. Representación de Techumbres guiadoras de luz. (<http://2030palette.org/intermediate-light-shelves/>)

VIDRIO DIRECCIONADOR DE RAYOS SOLARES

Los elementos acrílicos cóncavos apilados verticalmente dentro de una unidad de doble acristalamiento redirigen la luz solar directa desde todos los ángulos de incidencia hacia el techo. El componente principal de un sistema de vidrio que dirige el sol es una unidad sellada de doble acristalamiento que contiene los elementos acrílicos. Esta unidad

sellada normalmente se coloca encima de la ventana. El coeficiente de ganancia de calor solar de la unidad es 0.36, y su valor U es de aproximadamente 1.3 W / m²K (dependiendo de la combinación de llenado de vidrio y gas).

Una parte importante del sistema es el techo, que recibe la luz redirigida y la refleja hasta las áreas de tareas. Los elementos reflectantes inclinados en el techo se pueden usar para concentrar la luz reflejada en áreas de tareas específicas. Un techo blanco mate simple también funciona bien para redirigir la luz; la iluminación resultante será más difusa.

El vidrio que dirige el sol se coloca en el área de la ventana por encima de la altura del ojo para evitar el deslumbramiento y otros efectos de visibilidad. También se puede colocar enfrente de la fachada o detrás de ella en situaciones de retroadaptación. La altura del área con vidrio que dirige el sol debe ser, en la mayoría de los casos, aproximadamente del 10% de la altura de la habitación. La ventana de visualización inferior normal puede sombreadarse con persianas convencionales. El vidrio debe inclinarse en un ángulo de aproximadamente 20 ° para redirigir la luz solar desde las posiciones más bajas del sol.

El sistema está diseñado para usarse bajo la luz solar directa. La mejor orientación en una fachada es hacia el sur en zonas de clima moderado (en el hemisferio norte). En las fachadas oeste o este, solo es útil por la mañana o por la tarde. El sistema también desvía la luz difusa, pero el nivel de iluminancia alcanzado es mucho menor que con la luz solar directa. Por lo tanto, para las fachadas norte, los elementos tienen que ser más grandes.

El perfil de los elementos acrílicos ha sido diseñado para latitudes específicas. La altitud óptima del sol para el vidrio que dirige el sol es entre 10-65 °. En las regiones tropicales donde las altitudes del sol son más altas, el vidrio que dirige el sol debe instalarse en un ángulo vertical inclinado a fin de redirigir más luz. En este caso, la geometría de los elementos que dirigen el sol tendrá que cambiarse para evitar el deslumbramiento. Se debe instalar un tragaluz que dirija la luz con una inclinación de aproximadamente 20 ° hacia el sol.

El vidrio que dirige el sol está disponible comercialmente, aun así la única desventaja real para su uso es el costo. (Ver Figura 21)



Figura 21. Representación de Vidrios Direccionadores de Rayos Solares en el Edificio San Paolo diseñado por Renzo Piano, Turín. (Fotografía por Andrea Cappello, 2022) (<https://www.metalocus.es/en/news/intesa-sanpaolo-office-building-renzo-piano-building-workshop>)

cantidad. Es por eso que en algunos países se usan dobles acristalamientos que contienen entre sus hojas gas argón para que funcione como aislante y reduzca la ganancia de calor solar pero también evita el intercambio de energía del interior al exterior así que se crea un sistema cerrado evitando las ganancias o pérdidas de energía si se necesitan, es por esto que en México no son muy comunes, ya que las condiciones ambientales - climáticas son las adecuadas para el cambio constante de energía del exterior y el interior de una edificación mediante la envolvente. (Ver Figura 22)

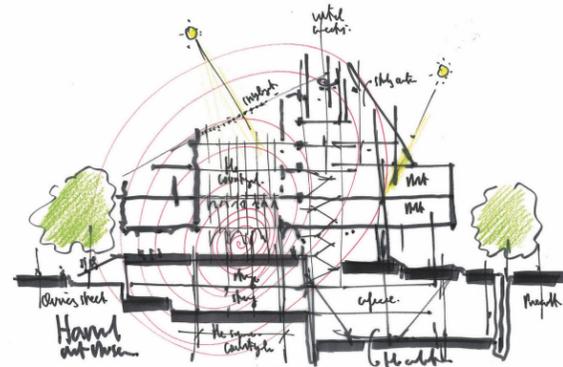


Figura 22. Esquema elaborado por Renzo Piano. <https://www.gsd.harvard.edu/event/renzo-piano-how-did-you-do-it-mr-piano/>

3 | 5.2 VIDRIOS CON PELÍCULAS REFLEJANTES Y ABSORBENTES

Incluso el cristal más claro y más fino no transmite el 100 por ciento de la radiación solar incidente. La radiación que no se transmite es absorbida o reflejada de la superficie. La cantidad que se absorbe depende del tipo de aditivos, y el grosor del acristalamiento. La cantidad que se refleja depende de la naturaleza de la superficie y el ángulo de incidencia de la radiación.

La absorción es principalmente una función de los aditivos que dan al acristalamiento un matiz o un tono de gris. Aunque el acristalamiento teñido reduce la transmisión de luz, por lo general no disminuye la ganancia de calor por mucho porque gran parte la radiación absorbida es entonces emitida hacia adentro. Un tipo de acristalamiento teñido se llama absorción de calor porque absorbe la parte infrarroja de onda corta de la radiación solar más que la parte visible. Pero incluso este tipo de acristalamiento reduce la ganancia de calor solar por sólo una pequeña

El vidrio tintado reduce, aunque sólo sea ligeramente, la carga solar a través de las paredes de cortina de vidrio. También proporciona el color a lo que era de otra manera a menudo la arquitectura dura. Originalmente estaba disponible sólo en verdes, grises y marrones, pero recientemente también está disponible en azul. El acristalamiento también bloquea la radiación solar por reflexión.

El ángulo en el que la luz del sol incide en una ventana tiene mucho más impacto en la cantidad de luz solar que se transmite de lo que generalmente se realiza. La cantidad de radiación solar que se refleja de un acristalamiento se puede aumentar significativamente mediante la adición de un revestimiento reflectante. Una superficie del acristalamiento está cubierta con un revestimiento metálico lo suficientemente delgado como para que todavía penetre alguna radiación solar. El porcentaje de reflectancia depende del grosor de este revestimiento, y un espejo no es más que un recubrimiento lo suficientemente grueso para que se reduzca la transmitancia de la radiación. El acristalamiento reflectante puede ser extremadamente eficaz para bloquear la radiación solar y al mismo tiempo permitir una vista. Es

más apropiado en las ventanas orientadas al este y al oeste y las ventanas del sur donde el calor del invierno no es necesario.

Bloquea la radiación solar mejor que el vidrio absorbente de calor, y lo hace sin ninguna distorsión de color. Sin embargo, reduce considerablemente la cantidad de luz que entra por las ventanas. Los cristales reflejantes también reflejan imágenes dramáticas de otros edificios, árboles, nubes, etc. Desafortunadamente, porque también refleja la luz del sol casi tanto como un espejo, los vecinos pueden terminar con deslumbramiento inesperado y calefacción solar adicional. Este problema se plantea con todos los tipos de acristalamiento, especialmente en ángulos de vista.

Una opción de acristalamiento mucho mejor está ahora disponible para reducir la ganancia de calor solar que el acristalado tintado o reflexivo, y se denomina acristalamiento selectivo "low-e" o de bajo consumo energético. El recubrimiento low-e bloquea la radiación infrarroja de onda corta (solar) más que la radiación de luz proporcionando así solamente luz (espectro visible). El revestimiento low-e se coloca en el lado interior del panel de la puerta de salida, el acristalamiento de absorción de calor se puede utilizar en el panel exterior sin que gran parte del calor absorbido entre en el edificio. La combinación de un revestimiento de low-e y una instalación de vidrio absorbente de calor crea un acristalamiento de ganancia de calor solar muy bajo que permite una buena cantidad de luz al interior. (Ver Figura 23)



Figura 23. Ejemplo de una fachada con vidrios Low-e. (<https://www.glassonline.com/global-and-china-low-e-glass-industry-report-2014-2017-now-available/>)

Aunque los sistemas de cristales tintados, reflectantes y selectivos de baja intensidad pueden ser eficaces dispositivos de sombreado, pueden también ser poco eficientes. No distinguen entre la luz del sol y la luz de la vista. Filtran la luz sin importar si se desea o no la iluminación natural.

Tienen sombra igual en días nublados y soleados y bloquean el sol de invierno deseable tanto como el sol indeseable del verano. Por lo tanto, los cristales teñidos o reflectantes no son apropiados cuando se requiere la iluminación natural, y ni ellos ni el acristalamiento selectivo low-e son apropiados cuando se desea el calentamiento solar.

Cuando se espera que el acristalamiento haga todo el sombreado, tiene que ser de un tipo de transmitancia muy bajo. La vista a través de este tipo de acristalamiento puede hacer que incluso el día más soleado parezca oscuro y sombrío. Por lo tanto, los dispositivos de sombreado externos, tales como salientes no sólo sombrean mejor, sino también tienen un sentido que equilibra el bloqueo del sol y la vista. El acristalamiento selectivo low-e es apropiado, sin embargo, para bloquear la radiación difusa del cielo, el sol bajo donde ningún otro sombreado permitiría una visión, y para el control del deslumbramiento.

Se está realizando mucho trabajo de investigación y desarrollo en sistemas de acristalamiento dinámico. Éstos se conocen como sistemas responsivos del acristalamiento porque cambian en respuesta a la luz, calor, o electricidad. Las gafas de sol que se oscurecen cuando se exponen a la luz del sol son un ejemplo de este tipo de vidrio.

REFERENCIAS

Lechner, N., (2015) *Heating, Cooling, Lighting, Sustainable Design Methods for architects*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Pollo, R. (2015). *Progettare l'ambiente urbano: Riflessioni e strumenti*. Roma: Carocci editore S.p.A. Studio Agostini.

Ruck, N. (2000). *Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components*. Washington: International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme Task 21.

Al revisar los materiales convencionales como el vidrio templado, los cristales tintados o con películas reflejantes y los elementos de sombreado estáticos podemos decir que al ser estáticos no siempre se pueden adaptar a los cambios climáticos y a las estaciones del año de las diferentes regiones climáticas. En el caso de los elementos de sombreado se puede llegar a perder las ganancias de energía por la radiación solar en invierno y así tener que usar sistemas de calefacción o de lo contrario se podría tener que llegar a usar sistemas de ventilación en verano por falta de elementos de sombreado que bloqueen los rayos incidentes de energía solar que entran directamente al interior por medio de las superficies transparentes.

En el caso de las persianas, cortinas o louvers, se puede llegar a perder la visibilidad hacia el exterior, el cual es una de las intenciones o cualidades más importantes que se quiere generar en el diseño de un espacio arquitectónico, a pesar de ser un sistema más dinámico, no siempre se puede obtener la visibilidad o la iluminación que se desea.

En el caso de las películas reflejantes o tintados podemos notar que además de que la imagen del exterior no se percibe con tanta nitidez, la película reflejante afecta al medio ambiente al reflejar los rayos incidentes del sol de la superficie de la envolvente hacia el exterior, el cual en una zona urbana al encontrarse más superficies reflejantes, se incrementa la temperatura del exterior siendo parte de la generación de la isla de calor urbana. (Ver Figura 24)

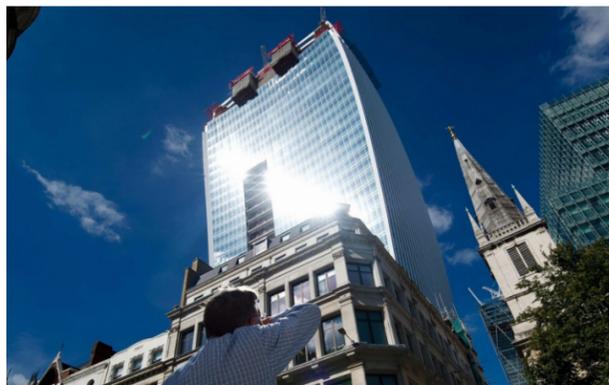


Figura 24. Fachada acristalada reflejante cóncava del edificio "Walkie-Talkie" en Londres. (Pictolic, 2013)

Ya que los sistemas tradicionales aportan ciertas ventajas pero al mismo tiempo pueden aportar ciertas desventajas, se está optando por la búsqueda de un sistema que tenga la capacidad de adaptarse a las condiciones ambientales que mejore las condiciones de confort en los aspectos visuales y térmicos que al mismo tiempo dicho sistema dentro de un material sea capaz de evitar la contaminación del medio ambiente al fomentar el uso de la luz y ventilación natural. Lo ideal sería encontrar un material tradicional que a partir de la tecnología y los nuevos conocimientos con el fin de que obtenga propiedades para poder generar un sistema de control lumínico y térmico dinámico que dependerá de las condiciones ambientales adecuadas para el uso del material o sistema, las intenciones de diseño, la economía y a la sociedad: Sustentabilidad.

En el mundo de la ciencia, tecnología e ingeniería se ha difundido que la idea de inteligencia en un objeto tiene que tener la capacidad de servirnos de algún modo para poder ayudarnos en tareas cotidianas, que a la vez nos pueden utilizar también como sirvientes de la tecnología. Se dice que los dispositivos deberían ser capaces de conseguir información o realizar un objetivo a partir de poco esfuerzo. A partir de esta investigación y con ayuda de libros sobre la tecnología y la ciencia de los materiales podemos decir que la inteligencia de los materiales o dispositivos tiene más que ver con la capacidad del ser humano para trabajar en conjunto con el medio ambiente para llegar a un equilibrio. Según Addington, los materiales siguen sin ser elegidos por su desempeño, si no por su significado o apariencia. Los materiales inteligentes y las nuevas tecnologías contienen un dilema, porque a la escala de su comportamiento tienen pocas cualidades connotativas. Ésta es una de las premisas para nuestra investigación. También explica los significados presentes en un "ambiente inteligente".

Caracterizaciones medioambientales:

Una corriente del significado gira en torno a la ocupación humana y el uso de los entornos espaciales; incluyendo la mejora de los procesos que responden y apoyan las necesidades humanas de vida, estilo de vida y trabajo. Un flujo relacionado se centra en los ambientes físicos que apoyan la actividad humana y el uso del espacio. Relación humana y ambiente físico (respuestas ergonómicas entre otras). Contiene el interés de apoyar y mejorar los procesos de vida en grupos particulares en necesidad,

como el cuidado de la salud. Dentro del mantenimiento de la cualidad y determinación del comportamiento del entorno físico ambiental se encuentra la administración del ambiente térmico, lumínico y acústico que trabajan dentro de un control del sistema estructural dinámico. Los acercamientos podrían ser: viento, ambiente térmico, luz y sonido. La habilidad del entorno físico para proveer un ambiente seguro bajo cualquier circunstancia incluyendo sus adversidades. Existen por ejemplo rangos de tecnología para monitorear y controlar el aire, calor o luz en el ambiente dentro de un edificio que usan sistemas activos de sensores de un tipo a otro. Por ejemplo, existen sensores que pueden detectar un terremoto y actuar para anular el daño.

Caracterizaciones cognitivas:

Una corriente que trata de la medida en que los procesos basados en la cognición están incrustados en el ambiente o en el entorno de uso. Se incluyen aquí enfoques que involucran emociones, pensamientos y cogniciones humanas que ocurren dentro del ambiente. Se han buscado e implementado tecnologías que nos pueden ayudar en este ámbito, que serían sistemas que nos pueden dar respuestas con base en la lógica y a la historia para tomar una mejor decisión, éstas tecnologías no tomarían decisiones. Serían supervisadas y controladas por el ser humano, simplemente ofrece una gama de opciones que nos ayudarían a entender la complejidad de la información del ambiente para llegar a un objetivo.

Caracterización de la implementación:

Otra corriente de significación se centra en las formas en que estas mejoras se invocan, operan y controlan. Se enfoca en objetivos y metas. Hay un modelo dentro de la caracterización que abarca los modelos constitutivos que están relacionados con los materiales inteligentes que cambian de propiedades en el cual un estímulo externo causa el cambio que afecta la respuesta para llegar a un objetivo. También se estudia los modelos basados en como funcionan los organismos vivos a partir de estímulos, sensores, respuestas y la función de la inteligencia están interconectadas.

Todos estos estudios se generan a partir del contexto que son las percepciones humanas, el uso del ambiente

y el ambiente físico que nos rodea que trabajan a partir de interfaces (factores) que generan un resultado en el ambiente a partir de sistemas de distintos tipos. A partir de nuestras bases ambientales nos podemos preguntar cómo evolucionarán los acercamientos hacia las tecnologías avanzadas en el tiempo. A partir del rol tradicional de la envolvente física de un edificio que sirve para múltiples funciones (barrera térmica, barrera del clima, modulador de luz, etc) podría ser mejorado con la utilización de materiales tradicionales que han demostrado su eficiencia con la implementación de tecnologías actuales a partir de los nuevos conocimientos que prueben su mejoramiento su desempeño.

Materiales inteligentes

La inteligencia de un material o sistema inteligente es determinado por sus propiedades, su estado y la energía aplicada en el material. Un material sólo puede considerarse inteligente si tiene la capacidad de alterar su estructura molecular y cristal así como su micro estructura causado por la energía interna del material. El material tiene la capacidad de absorber la energía que entra y sufre un cambio en sus propiedades (Ferrara, 2014).

Según Ferrara, et. al., Las características físicas de los materiales inteligentes están determinadas por estos campos de energía y el mecanismo a través de que este aporte de energía a un material se convierte. Si el mecanismo afecta la energía interna del material mediante la alteración de la estructura molecular o la micro-estructura entonces la entrada da como resultado un cambio de propiedad del material. Si el mecanismo cambia el estado de energía de la composición material, pero no altera el material, entonces la entrada da como resultado un intercambio de energía de una forma a otra.

Una manera simple de diferenciar entre los dos mecanismos es que para el tipo de cambio de propiedad, el material absorbe la entrada de energía y sufre un cambio, mientras que para el tipo de energía de cambio, el material permanece igual pero la energía sufre un cambio. Consideramos estos mecanismos para operar a micro-escala, ya que ninguno afectará a algo más grande que la molécula, y además, muchos de los cambios energéticos ocurren a nivel atómico. Los materiales inteligentes pueden formar un sistema que usualmente está compuesto por un sensor, el cual tiene la función de detectar un cambio en el ambiente. Dentro del

sistema se encuentra un grupo de control que se encarga de procesar la información y decide el tipo de acción que debería tomar, un actor el cual realiza la acción deseada. Los sistemas inteligentes no necesariamente cuentan con materiales inteligentes, los materiales que si actúan como sistemas inteligentes se llaman sistemas de material inteligente.

Una definición más convincente viene de la Enciclopedia de Materiales Inteligentes Químicos y Nuevas Tecnologías de los 8 Materiales en arquitectura y diseño (Encyclopedia of Chemical Smart Materials and New Technologies in architecture and design). Tecnología: “materiales inteligentes y estructuras son aquellos objetos que detectan eventos ambientales, procesan esa información sensorial, para después actuar en el ambiente.” (Ferrara, 2014)

Existen distintos tipos de materiales inteligentes, pero en este caso nos vamos a enfocar en los materiales que tienen propiedades dentro de su estructura molecular que a partir de un estímulo pueden cambiar sus propiedades cromáticas; debido a esta particularidad se llaman materiales “cromogénicos”. (ver Figura 25)



Figura 25. Modelo de chamarra hecha con materiales termocrómicos diseñada por Carlo Rivetti. (Dazed Digital, 2011).

Existen cinco características fundamentales que distinguen a los materiales inteligentes de los convencionales en arquitectura que son: transitoriedad, selectividad, inmediatez, autonomía y direccionalidad (Addington 2005).

- 1: Capacidad para cambiar de propiedades
- 2: Capacidad para intercambiar energía
- 3: Ubicación, medida discreta
- 4: Reversibilidad

Éstas características tienen el potencial para optimizar las propiedades del material para adaptarse mejor a las condiciones transitorias de entrada o para optimizar algunos comportamientos para mantener las condiciones de estado estacionario en el entorno.

Los campos de energía que son los tipos de estímulos que pueden tener los materiales inteligentes son: energía potencial, eléctrica, térmica, mecánica, química, nuclear y cinética que pueden ser intercambiados o convertidos de acuerdo a La Primera Ley de la Termodinámica (Conservación de la energía).

Las características físicas de los materiales inteligentes son determinados por los campos de energía y los mecanismos por los cuales la energía que entra a la materia es convertida para crear un efecto.

Según Addington, los materiales inteligentes se clasifican con base en su interacción con la energía. Cuando el mecanismo afecta la energía interna del material alterando su estructura molecular o su micro-estructura entonces los resultados se genera un “cambio de propiedad” del material. Si el mecanismo cambia la energía de estado de la composición del material, pero no altera el material, entonces se obtiene como resultado un “intercambio de energía” de un tipo a otro.

Una manera para diferenciar entre los mecanismos en el caso del cambio de propiedad, el material absorbe la energía de entrada y sufre un cambio, mientras que para el tipo de intercambio de energía, el material permanece igual pero la energía sufre un cambio. Ambos mecanismos funcionan a escala micro, ninguno afectará a algo más grande que la molécula, y además, muchos de los intercambios de energía tienen lugar a nivel atómico así que no podemos visualizar este comportamiento físico en la escala en la que ocurre.

Cambio de propiedades en los materiales inteligentes

Materiales inteligentes de Tipo 1

Tiene el potencial más grande en arquitectura. Los materiales sufren un cambio en sus propiedades químicas, térmicas, mecánicas, ópticas o eléctricas en respuesta a los cambios en las condiciones en el ambiente, generalmente, sin la necesidad de control externo. Algunos de los materiales con esta capacidad son los materiales que cambian de color como los fotocromicos, que son nuestro objeto de estudio. Los materiales inteligentes del Tipo 1 reaccionan debido a la absorción de la radiación electromagnética de superficie o molecular modificada mediante un cambio ambiental (radiación solar incidente, temperatura superficial) o una entrada de energía directa al material (corriente, voltaje). Intercambio de energía en los materiales inteligentes.

Materiales inteligentes de Tipo 2.

Se espera que podría tener una aplicación en arquitectura. Estos materiales cambian la energía entrante a otra forma para producir energía saliente según la primera ley de la termodinámica. La eficiencia de conversión de energía para materiales inteligentes como la fotovoltaica y la termoelectrica suele ser mucho menor que en las tecnologías más convencionales, la utilidad potencial de la energía es mucho mayor. Por ejemplo, la relación directa entre la energía de entrada y la energía de salida convierte a muchos de los materiales inteligentes como los piezoeléctricos, piroelectrónicos y fotovoltaicos, como excelentes sensores ambientales. (Addington, 2005)

Reversibilidad / Direccionalidad

Muchos de los materiales con procesos de intercambio de energía y cambio de propiedades pueden tener la capacidad de reversibilidad o de bi-direccionalidad.

Algunos de los materiales de conversión eléctrica pueden revertir sus formas de energía de entrada y salida. Por ejemplo, algunos de los materiales piezoeléctricos pueden producir una corriente con una deformación aplicada o pueden deformarse con una corriente aplicada. Los materiales con cambios de propiedad bidireccionales o comportamientos de intercambio de energía pueden permitir un mayor uso de su cambio transitorio en lugar de sólo energías y / o propiedades de entrada y salida. Las

características de absorción de energía de los materiales que cambian de fase se pueden utilizar ya sea para estabilizar un entorno o para liberar energía al medio ambiente dependiendo de la dirección en la que se esté produciendo el cambio de fase. El material permite el reemplazamiento de componentes de muchas partes debido a que se pueden producir múltiples salidas o salidas que se pueden sustituir.

Una de las características fundamentales que diferencia los materiales inteligentes de los convencionales es el tamaño discreto y la acción directa del material. La eliminación o reducción de componentes adicionales y, en algunos casos, incluso conexiones de empaquetado y alimentación, permite minimizar el tamaño de la parte activa del material. Un elemento compuesto de un material inteligente no solo será más pequeño que un material tradicional si no que también requerirá menos soporte infraestructural.

El tamaño más pequeño hace que estos materiales sean más efectivos como sensores: son menos propensos a interferir con el entorno que miden, y es menos probable que requieran ajustes de calibración. (Addington 2005)

Podemos ejemplificar en la siguiente tabla las características de los materiales fotocromicos, materiales inteligentes de Tipo 1 (cambio de propiedades) contra un Piezoeléctrico, materiales inteligentes de Tipo 2 (intercambio energético para un mejor entendimiento. (Ver Tabla 1)

| Tipo de Material | Energía Entrante | Energía Saliente |
|------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| Fotocromico | Radiación (UV y visible) | Cambio de color |
| Piezoeléctricos | Deformación | Diferencia de potencial eléctrico |

Tabla 1. Características de los materiales inteligentes (Addington, 2005).

En esta investigación nos vamos a enfocar en los sistemas cromogénicos que funcionan a partir de propiedades ópticas, por lo cual tenemos que analizar y entender como reacciona ante la luz.

REFERENCIAS

Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies*. Oxford: Architectural Press.

Ferrara, M., Bengisu, M. (2014). *Materials that change color*. Milano: Politecnico di Milano, Springer.

3 | 7 MATERIALES CROMOGÉNICOS

El estudio de materiales cromogénicos se empieza por el entendimiento de las leyes naturales expresadas por la teoría del color: la luz natural la cual nos aparece como color blanco en realidad es una mezcla de los colores primarios. La causa física que produce la sensación de color es la interacción de radiación lumínica con los electrones externos del objeto que observamos; el color que observamos es la radiación visible que reflejan las superficies, y de un color complementario a la radiación absorbida por el objeto.

El principio técnico de los materiales cromogénicos se explica con el equilibrio de los electrones causados por estímulos, con la modificación de propiedades ópticas tales como reflectancia, absorción, emitancia, y transmitancia. El proceso llamado cromismo se trata de un cambio en la micro estructura o el estado electrónico de la materia, cambiando las propiedades ópticas del material.

La mayoría de los cromismos en los polímeros ocurre en los polímeros conjugados los cuales tienen uniones débiles y electrones que se mueven con libertad.

La causa del cromismo en los polímeros es provocado por estímulos externos los cuales tienen la habilidad de alterar su configuración y transición de electrones en la materia.

Los materiales que cambian de propiedades como los fotocromicos, termocromicos, electrocromicos, etc. Sufren un cambio en sus propiedades ópticas debido a un cambio en su fuente de energía externa llamado "cambio de color" que en realidad no cambian de color. Cambian sus propiedades ópticas debido a distintos estímulos como ya lo habíamos mencionado en las cuales podemos percibir como un cambio de color que dependen completamente de dos

factores externos (la luz y la naturaleza del ojo humano) y de factores internos físicos.

Podríamos decir que su cambio es mucho más complejo que solo un "cambio de color", teniendo en cuenta los factores externos que afectan nuestra percepción de color son muchos. El color es fundamentalmente una propiedad de la luz. Toda la incidencia de luz puede ser caracterizada por su distribución espectral de la longitud de ondas electromagnéticas.

Las superficies solo pueden reflejar, absorber o transmitir las longitudes de onda que son siempre sustractivas al igual que el ojo humano pero comparativamente. Así que dependiendo del espectro y de la distribución de la intensidad dentro del rango visual, el color es relativo dentro del contexto del ojo humano. También el color depende de las cualidades ópticas de un material.

La luz consiste en impulsos energéticos, reacciona con los electrones cargados con energía negativa de un material. Dependiendo de la estructura cristalina o molecular del material, la luz que intenta pasar a través puede ser retrasada, redirigida, absorbida o convertida en otro tipo de energía. Esta estructura determinará cómo se comportará la luz dependiendo de estas posibilidades así como que longitudes de onda serían alteradas (que causaría el cambio en la percepción del color en el material). Siendo la superficie el actor principal en la percepción del color se puede alterar la superficie con blindajes, películas, pinturas, etc. Las cuales determinan la respuesta a la luz mucho más que el sustrato.

En el caso de materiales inteligentes con cambios aparentes de color se diseñan para cambiar con la entrada de energía externa. La entrada de energía produce una alteración en la estructura molecular o la orientación de la superficie del material en la cual incide la luz. La estructura depende de la composición química del material así como la organización del cristal o la molécula. La energía de entrada puede venir en distintas formas como en forma de calor o energía radiante asociados siempre con la luz, pero siempre reacciona con los electrones con carga negativa presentes que afectan la absorción o reflectancia del color percibido que pueden estar dentro del espectro completo de luz o espectralmente seleccionados (Addington 2005).

Los materiales cromogénicos se pueden clasificar, dependiendo del estímulo al que reaccionan en diferentes categorías descritas en las siguientes secciones.

3 | 7.1

MATERIALES FOTOCRÓMICOS

En esta categoría los materiales cambian de color cuando la intensidad de la luz (radiación UV y parte del visible) cambia, por ejemplo: Los lentes de sol que cambian con el incremento de los rayos UV y optimizan la luz que pasa a través del lente. Otro ejemplo podría ser cuando la intensidad de los rayos UV es baja en el interior de un edificio, los lentes se vuelven más transparentes y es más fácil ver a través de ellos. Ésta clasificación será estudiada y analizada más a profundidad en ésta investigación.

3 | 7.1.2

MATERIALES TERMOCRÓMICOS

Son los materiales que responden al cambio de la temperatura en el ambiente cambiando de color. Un ejemplo muy conocido que contiene esta propiedad es una taza de cerámica que cambia de color cuando hay un líquido caliente en el interior. La transformación es reversible, así el color de la taza vuelve a su color original cuando se enfría o pierde calor hasta llegar a la temperatura del ambiente. En la arquitectura, la búsqueda aparentemente interminable de mostrar la presencia pasada de una persona en un lugar particular ha encontrado una nueva herramienta para la expresión. Por ejemplo, los materiales son sensibles al calor del cuerpo y muestran una "huella" de color de una persona que acaba de sentarse en los muebles. La imagen se desvanece con el tiempo.

Se ha buscado también utilizar materiales termocromicos en el exterior de un edificio. Desafortunadamente, un problema importante con el uso de las pinturas termocromicas actualmente disponibles en el exterior es que la exposición a las longitudes de onda ultravioleta a la luz del sol puede causar que el material se degrade y pierda sus capacidades de cambio de color (Addington, 2005).

3 | 7.1.3

MATERIALES MECANOCRÓMICOS / PIEZOCRÓMICOS

Cambian de color cuando un estímulo mecánico es aplicado. Éstos materiales son estudiados a profundidad actualmente por su potencial en el uso de detección de estrés en especial en la supervisión de fallas debido a fractura, corrosión, fatiga o arrastramiento.

3 | 7.1.4

MATERIALES ELECTOCRÓMICOS

Son aquellos materiales que reaccionan por medio de un cambio en sus propiedades ópticas debido a la aplicación de un campo eléctrico. Uno de los materiales actuales en el mercado son los espejos anti-empañamiento que detectan el deslumbramiento y automáticamente lo compensan especialmente en la noche para conducir con seguridad. Electrochromismo es de los más versátiles dentro de los cromogénicos porque es fácil de controlar y se puede combinar con distintos estímulos como estrés o temperatura. Muchas compañías han estado desarrollando productos que incorporan estas características en sistemas de tan pequeño como una ventana residencial a tan grande como la pared de cortina de un edificio. En una aplicación típica, la transparencia relativa y el matiz de color de las ventanas electrocromicas pueden controlarse eléctricamente. Tenga en cuenta, sin embargo, que es necesario que la tensión permanezca encendida para que la ventana permanezca en un estado oscurecido. Esto puede ser desventajoso por muchas razones además de que tiene un número de ciclos limitados en su reacción, al perder su efecto deja de ser un material inteligente. (Addington 2005).

3 | 7.1.5

MATERIALES QUIMIOCRÓMICOS

Son los materiales que responden a los cambios químicos en el ambiente cambiando de color. Esta propiedad es usada para fabricar ventanas de doble cristal con la habilidad de cambiar de color cuando entra en contacto con gas hidrógeno en el espacio entre los cristales (materiales gasocromicos). El compuesto óxido de tungsteno (WO_3) se usa como revestimiento con la ayuda de capas catalizadores que cambian de transparente a azul oscuro y reduce la transmitancia de una luz.

Materiales Halocromicos son un subgrupo de los quimiochromicos los cuales cambian de color con base al cambio de pH en el ambiente. Ionocromico es un término similar a quimiochromico, que indica la reacción a la presencia de iones en un medio por una variación de color. Hygro e Hidrocromico son otro sub grupo los cuales reaccionan por la humedad o la presencia de agua debido a un fenómeno llamado solvatocromismo. La definición de solvatocromismo es un cambio en la absorción del espectro de compuestos químicos causados por el medio que lo rodea. Éste efecto se ha usado por más de cien años para estudiar las reacciones solventes y la polaridad en los rayos UV, visibles, y cerca

del rango de rayos infrarrojos del espectro magnético. Para fines prácticos en el espectro visible, solvato-cromismo es un cambio de color causado por la interacción entre disoluto - solvente y éste efecto ha sido estudiado para entender el comportamiento sintético y natural de los tintes en los distintos solventes.

3 | 7.1.6 MATERIALES MAGNETOCRÓMICOS

Son aquellos que responden a las variaciones del campo magnético aplicada a la sustancia. Se han realizado investigaciones para sus aplicaciones como por ejemplo el papel magnético del color reflejado.

3 | 7.1.7 MATERIALES BIOCROMÓMICOS

Estos materiales fueron desarrollados para detectar y reportar la presencia de patógenos con un cambio de color. Una de las aplicaciones potenciales que se buscan obtener de este fenómeno es la detección de patógenos en contra de intoxicación o bioterrorismo.

Los materiales cromotrópicos pueden ser referidos como una sub-categoría de materiales cromogénicos donde el cromotropismo específicamente se refiere al cambio en las características ópticas (transparencia o dispersión de la luz) debido a cambios micro-estructurales contenidas en el material que ocurren mediante estímulos químicos o físicos como un solvente, temperatura, presión, luz o electrones dependiendo del estímulo al cual reaccionan se deriva su clasificación.

REFERENCIAS

Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies*. Oxford: Architectural Press.

Ferrara, M., Bengisu, M. (2014). *Materials that change color*. Milano: Politecnico di Milano, Springer.

Tilley, R. J. D. (2011). *Colour and the Optical Properties of Materials*. Chichester: Wiley & Sons.

3 | 8 MATERIALES FOTOCRÓMICOS

Nuestro objeto de estudio será tratado con base en el comportamiento de los materiales con propiedades fotocromáticas con el fin de tener un estudio aplicado a fachadas dinámicas. Para ello entraremos más a profundidad en las características y estudios que se han realizado con estos materiales.

La definición de materiales fotocromáticos son aquellos que responden a las variaciones de luz (visible y ultravioleta) percibidas o la distribución espectral de la luz modificando su color teniendo la capacidad de revertir el efecto con la disminución de estímulos lumínicos; esto lo vuelve un material inteligente. Los materiales fotocromáticos generalmente están formados a partir de moléculas orgánicas inestables. Son transparentes cuando la luz es de baja intensidad y están absorbiendo luz. (Ver Figura 26)

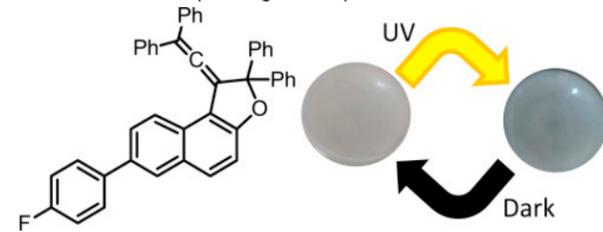


Figura 26. Representación gráfica del efecto fotocromático a nivel molecular y su reacción en los materiales. (Graça, 2020)

Sus propiedades ópticas cambian debido al efecto de inducción de la radiación electromagnética por fotones energéticamente ricos en la región ultravioleta, cambiando su configuración molecular y su coeficiente de transmisión de luz manifestando un color y reduciendo su transparencia. Cuando se elimina el estímulo alta intensidad, el color desaparece porque el material vuelve a su configuración molecular original. La mayoría de las fuentes indican que los materiales fotocromáticos reaccionan con la radiación UV, mientras que solo algunas fuentes mencionan que también reaccionan debido a la radiación visible o por parte de las ondas del espectro visible (violetas y azules), Addington toma como definición de material fotocromático aquel que cambia de color en respuesta a un cambio de energía con luz o radiación ultravioleta. (Addington, 2005)

Los materiales fotocromáticos absorben energía radiante

que causa un cambio reversible en una especie química independiente entre dos estados de energía diferentes. Dependiendo de la energía incidente, el material cambia entre las partes reflexibles y absorbentes del espectro visible selectivas. La molécula es usada para tintes fotocromáticos aparece sin color en su forma desactivada. Cuando se exponen los fotones de una longitud de onda particular (especialmente las ondas UV), la estructura molecular se altera en un estado excitado, y así comienza a reflejar en las longitudes de onda más largas en el espectro visible. (Ver Figura 27)



Figura 27. Tinta fotocromática expuesta a ondas Ultra Violeta por LuminiKrom®, 2020.

Al retirar la fuente ultravioleta (UV), la molécula volverá a su estado original. Una película fotocromática típica, por ejemplo, puede ser esencialmente transparente e incolora hasta que se expone a la luz solar, cuando la película comienza selectivamente a reflejar o transmitir ciertas longitudes de onda (tales como un azul transparente). Su intensidad depende de la directa de la exposición. Regresa a su estado original incoloro en la oscuridad cuando no hay luz solar (Addington, 2005).

La respuesta fisiológica de la combinación ojo-cerebro surge cuando las ondas de luz caen sobre la retina sensible a la luz, que forma la superficie interna del ojo. En 1876, Boll informó que el pigmento rojo-púrpura encontrado en esta parte de los ojos de los animales se blanqueaba en presencia de la luz en una forma incolora. Se encontró que el cambio era reversible, y en la oscuridad se regeneró el color púrpura. Esta importante reacción fotocromática es la fuente de la visión. El compuesto involucrado se hizo conocido como 'púrpura visual' y ahora se llama rodopsina. Un compuesto orgánico fotocromático es uno que experimenta un cambio de color reversible mayor, generalmente de incoloro a coloreado intenso, en la irradiación con luz.

Cuando el material fotocromático es incoloro, no se absorbe en lo visible, y la frecuencia ideal para el fotón activador es casi ultravioleta. La reacción inversa tiene lugar cuando la forma coloreada de la molécula absorbe la luz con una frecuencia cercana al máximo de absorción para volver a producir el producto incoloro.

La primera reacción fotocromática de una molécula orgánica que informó Ter Meer en 1876 fue la de la sal de potasio del dinitroetano, que cambia de incolora a roja en la luz solar y de nuevo a incolora en la oscuridad. Desde mediados de la década de 1950 ha habido un gran número de estudios de moléculas fotocromáticas, y en la actualidad se conocen muchos cientos de compuestos orgánicos fotocromáticos. Han encontrado usos en aplicaciones como gafas de sol fotocromáticas y gafas de esquí y se exploran activamente para pantallas y almacenamiento de información (Tilley, 2011).

Los materiales fotocromáticos cambian sus propiedades como respuesta a la luz, la transmisión de luz se reduce automáticamente con la exposición a los rayos ultravioleta o los rayos visibles de onda corta. Fotocromismo es una de las técnicas más viejas que se implementó como idea de cambio de color en los materiales, se reportó su primera referencia en 1880 (Wigginton 1996 Hutchins et al., 2000). En 1937 el científico R.H. Dalton notó el fenómeno del ya conocido comportamiento del vidrio que contiene cobre, que se volvía rojo cuando se calentaba. Dalton descubrió que dicho acristalamiento debido a los rayos de onda corta (radiación ultravioleta), antes de recalentarse logra un cambio más rápido de color en una temperatura más baja. La importancia del vidrio fotocromático es que el fenómeno que causa su oscurecimiento se deriva de la química del mismo vidrio, en vez de un recubrimiento. La estructura química del acristalamiento fotocromático consiste en la eliminación del oxígeno, la combinación con hidrógeno, o la disminución de la valencia positiva mediante la adición de electrones a un vidrio que contenga haluros de cobre o plata. (Elkadi, 2006)

Ejemplos de materiales Cromogénicos

Según Ferrara, et. al. (Ferrara, 2014), un ejemplo de materia que contenga ésta propiedad es el "Rhodopsin", es una sustancia natural (orgánica) fotocromática presente en la retina del ojo; es un pigmento que se activa con la luz produciendo un estímulo al nervio transmitido a la corteza

para empezar el proceso de percepción visual. También se ha descubierto una proteína llamada bacteriorhodopsin (BR) en la bacteria "Halobacterium salinarum" en 1917. Se han descubierto distintos efectos físicos dentro de ésta proteína (BR) como el proceso de la transformación o conversión de energía (fotosíntesis), fotocromismo y fotoelectrismo.

Pigmentos con propiedades fotocromáticas se pueden mezclar con materiales convencionales y ser usados en combinación con otros pigmentos para obtener pinturas y tintas con efectos que cambian de un color a otro. En el mundo de la moda se ha experimentado con estos pigmentos para crear diseños de ropa y tener diseños que se puedan adaptar a las temporadas y tener diseños dinámicos e interesantes para sus consumidores.

Otro ejemplo podría ser el uso de objetos o dispositivos con propiedades fotocromáticas que se usan entre dos capas de materiales convencionales teniendo absorciones de energía diferentes. Estos materiales están basados en el principio de absorción de luz, teniendo como objetivo controlar o regular los rayos ultravioleta (UV) e infrarrojos IR como los lentes de sol.

El uso de propiedades fotocromáticas en vidrios o cristales se han utilizado también a escala arquitectónica; es por esto que nos enfocaremos más en profundizar su estudio para su aplicación. Por ejemplo se han utilizado en ventanas para edificaciones, para realizar marcos "sensibles" a la luz pero se han encontrado principalmente dos problemas en su uso arquitectónico:

- Problemas técnicos y de proceso en la elaboración de los vidrios debido a que no se pudo obtener una dispersión uniforme de las sustancias fotocromáticas a esa escala.
- Pérdida gradual del efecto fotocromático con el tiempo, también llamado "fatiga", sus propiedades no permanecen lo suficientemente como para ser un material eficiente.

Se han realizado experimentos en donde se han podido resolver algunas de sus dificultades técnicas, aumentando el tamaño de la hoja de vidrio con propiedades fotocromáticas y su estabilidad con el tiempo reduciendo costos de producción y aumentando su ciclo de vida útil volviéndola una tecnología eficiente (Ferrara, 2014).

3 | 8.1

MATERIALES CROMOGÉNICOS VS. FOTOCRÓMICOS

Una de las problemáticas con la que tendríamos que lidiar con el uso de materiales fotocromáticos sería en las latitudes septentrionales (nórdicas) en el invierno debido a que el ángulo de incidencia solar es muy bajo y la temperatura exterior también es muy baja. La respuesta ideal para ambas condiciones son opuestas entre sí, en ángulo del sol provocaría el opacamiento de la ventana con propiedades fotocromáticas reduciendo la transmisión de la radiación al interior, pero la pérdida conductiva hacia el exterior sería mejor compensada con una tasa de transmisión más alta. Existe también la preocupación por el color resultante del material fotocromático en su estado de absorción. Dependiendo del producto químico fotosensible añadido a la matriz de vidrio, el color resultante es gris o marrón - los cuales no serían colores óptimos para las fachadas en el hemisferio norte.

Los materiales termocrómicos son más amenos al cambio de temperatura pero lo hacen sacrificando la regulación de la cantidad de luz. Debido que el calor es la energía de activación, el acristalamiento del material funciona mejor en la región de los infrarrojos del espectro solar. El punto de cambio deseado es regulado desde la temperatura interior para que la temperatura del acristalamiento comience a aumentar: debido a la absorción de la radiación solar o a las temperaturas exteriores muy altas. La transmisión de la radiación es reflejada más que ser transmitida. La aplicación del acristalamiento termocrómico tiene que superar su poca transmisión en la parte visual del espectro, el cual actualmente tiene un rango del 27 al 35% de transmisión. Debido a que se pierde la vista y la provisión de la luz del día los materiales termocrómicos han sido poco utilizados en el desarrollo de ventanas inteligentes.

Los materiales termotrópicos responden al mismo aporte ambiental que los termocrómicos, pero la diferencia está en el mecanismo interno, los termotrópicos desarrollan una aplicación más amplia. Mientras que los termocrómicos cambian de transmisivo a reflexivo, los termotrópicos sufren un cambio en la espectacularidad, dando como resultado la capacidad de proporcionar luz diurna difusa incluso cuando la vista se ve disminuida. Una característica que ofrecen es la

capacidad de cambiar la conductividad del acristalamiento, así como su transmisividad.

Este efecto es más pronunciado cuando se utiliza un hidrogel para llenar una cavidad en doble acristalamiento, en comparación con el uso de una lámina de polímero como el termotrópico. Algunos hidrogeles pueden tener dos estados de transición, volviéndose opacos tanto a baja como a alta temperatura, haciéndolos útil para prevenir la pérdida radiante desde el interior durante el invierno. Aunque no están tan disponibles comercialmente como los diversos sistemas de acristalamiento electrocrómico, se espera que se vuelvan populares para cualquier tipo de aplicación, tales como claraboyas, donde la luz en vez de la vista es primordial.

Una de las dificultades de los tipos de ventanas inteligentes mencionadas que funcionan a partir de la energía en el ambiente es la inhabilidad de activar o desactivar su transición. La luz, el calor y la vista deben cruzar la fachada acristalada, y la optimización de un solo factor ambiental es poco probable que coincida con la respuesta deseada a las otras condiciones ambientales. Es por esto que se han desarrollado o se ha invertido más en materiales que se activan por medio de energía eléctrica para que el usuario tenga la capacidad de controlar su efecto pero al mismo tiempo conlleva a una contradicción entre lo sustentable, ya que además de tener una infraestructura compleja que requiere mantenimiento, se necesita de una planta de energía aplicada, en el caso de los electrocrómicos, a cada sección del panel programada para su protección lo cual no es sustentable porque no usa la energía que se encuentra en el medio, si no la energía eléctrica que al menos se usa mientras está activada. A diferencia del desarrollo de la electrocromía, que creció exclusivamente a partir del deseo de usarlos en la construcción de envolventes, el cristal líquido entró en el mercado de la arquitectura completamente probado y refinado. Las cuestiones relativas a su durabilidad, mantenimiento, dimensionamiento, montaje y embalaje (esto se refiere a la prestación de un suministro eléctrico) se habían abordado y al menos parcialmente resuelto. Los arquitectos sólo tenían que empezar a emplearlos.

A pesar de estas ventajas, sin embargo, hay inconvenientes importantes asociados con el acristalamiento de cristal líquido. La primera es que cuando se transforma de su estado decolorado a su color, la energía de transmisión

no cambia, sólo su espectacularidad a difusa. La razón principal de la cromogenia es reducir la radiación infrarroja no deseada, entonces los dispositivos de cristal líquido son apenas satisfactorios. Además, a diferencia de los electrocrómicos, que requieren energía sólo cuando ocurre el cambio en estados (que permiten el uso de baterías para su suministro energético), los cristales líquidos requieren energía continua en su estado transparente. Y la alineación lineal de los cristales cuando en la etapa transparente reduce significativamente la vista desde ángulos oblicuos. Incluso con estos inconvenientes, el uso del cristal líquido está aumentando en los proyectos, particularmente las residencias donde el aislamiento y la luz amplia son más importantes que la energía.

Tenemos que preguntarnos como estrategia de diseño si deseamos reducir la radiación infrarroja que transmite a través del acristalamiento sin perder la vista o si estamos dispuestos a perder la vista, pero no la luz, que tan importante es el control del deslumbramiento. La transmisión especular proporciona la visión, mientras que la transmisión difusa produce una superficie opaca. (Ver Figura 28)



Figura 28. Uso de vidrio electrocrómico en fachadas. Cortesía de Glass App Source. <https://www.findlight.net/blog/2018/02/22/smart-glass/>

Un acristalamiento que tiene una transmisión de especular a especular no afectará la vista, sino que reducirá la intensidad de la radiación transmitida.

Diferentes tipos de recubrimientos determinarán en qué ancho de la banda sucederá esa reducción. Obviamente, para el control del calor, el material de acristalamiento ideal sería poco afectado en el rango visual, pero muestra una transmisión notablemente reducida en el rango de los rayos infrarrojos. Por otra parte, para el control del acristalamiento, una reducción en la intensidad de la transmisión de luz es importante. Si los requerimientos son para incrementar la privacidad mientras se aprovecha al máximo la luz del día

entonces los cristales líquidos son la mejor opción. Si se necesita minimizar el intercambio de energía a través del material, entonces un material termocrómico es la mejor opción (Addington 2005).

Pero si se quiere regular la radiación UV y los efectos de la luz durante todo el año (en zonas con climas templados y temperaturas constantes) aprovechando la luz necesaria durante el día sin perder completamente la visibilidad al exterior y sin necesidad del uso de fuentes de energía entonces los materiales fotocromáticos son los ideales para el uso en el diseño de la envolvente.

Dentro de los materiales fotocromáticos existen materiales fotocromáticos orgánicos e inorgánicos. Generalmente hay dos tipos de materiales fotocromáticos orgánicos: tipo T y tipo P.

El tipo T se refiere a aquellos que podrían experimentar decoloración térmica, como azobencenos, espiropiranos, espirooxazinas, naftopiranos, etc (compuestos químicos). Por el contrario, el fotocromismo de tipo P es térmicamente irreversible. Es decir, todos los procesos de coloración y decoloración son manejados solo por la luz.

Los compuestos como ditieniletanos, fulgidos, pertenecen a fotocromos de tipo P. Mientras que la investigación científica está más interesada en el fotocromismo de tipo P termoestable, en la industria, el fotocromismo de tipo T (principalmente espirooxazinas y naftopiranos) es el que domina, ya que se ha encontrado más potencial para su aplicación en artefactos ya que sus propiedades son reversibles y se pueden utilizar en distintos campos industriales, además que dentro de los compuestos fotocromáticos son de los más abundantes.

Los materiales fotocromáticos deben cumplir rápidamente una serie de formas para satisfacer la demanda y la coloración debe ser lo suficientemente oscura cuando se aplica luz. La vida media adecuada de la decoloración para las aplicaciones deseadas: para el fotocromismo de tipo T, lo que importa es la vida media de termoblanqueo. Por ejemplo los lentes oftálmicos, la decoloración de las lentes debe ser rápida cuando los usuarios están al interior de un espacio arquitectónico, en caso de que la visión no se vea afectada cuando los niveles de luz caen. Además, las lentes deben ser completamente incoloras cuando se decolora.

Alta eficiencia de interconversión: para la coloración, cuanto más coloreada sea se utilizan menos productos, por lo tanto, más económico. Para la decoloración, el residuo coloreado debe ser lo suficientemente bajo como para evitar el resto de los tonos no deseados. (Zhang, 2016)

A manera de conclusión podemos decir que se debe de escoger la tecnología de los materiales o ventanas inteligentes como estrategia dependiendo de nuestros objetivos que pueden depender del proyecto, del tipo de usuario o de condiciones climáticas sobre todo en las condiciones de luz y temperatura que se relaciona los recursos energéticos disponibles que se pueden obtener por medio del medio ambiente o mediante voltaje eléctrico. De igual manera, es importante para su elección tomar en cuenta las referencias económicas de los materiales cromogénicos.

Debido a su proceso en la preparación de materiales cromogénicos, su precio es significativamente más caro con respecto a los materiales convencionales. Puede ser hasta 4 veces más dependiendo del tipo de material. (Ver Tabla 2)

| Tipo de cromogénico | Dimensiones | Precio (Dólar) | Año | Proveedor |
|---|--------------|-----------------|------|---------------|
| Tinta convencional contra rayos UV | 1 galón | 100 \$ - 200 \$ | 2014 | Desconocido |
| Tinta termocrómica contra rayos UV | 1 galón | 800 \$ | 2014 | Desconocido |
| Ventana electrocrómica | 57 x 57 cm | 1,000 \$ | 2009 | Pawlicka |
| Lámina vinil termocrómica | 15 x 15 cm | 20 \$ - 30 \$ | 2013 | Inventables |
| Etiquetas termocrómicas y fotocromáticas | 2.5 - 6.5 cm | 7.00 \$ | 2013 | Thometer Site |
| Pigmento en polvo termocrómico de distintos colores | 20 gr | 30 \$ | 2013 | Amazon |

Tabla 2. Tipos de materiales Cromogénicos (Ferrara, 2014).

Podemos observar en la tabla que el precio de una ventana electrocromática de 57 cm x 57 cm fue de 1,000 dólares en el 2009. El precio adecuado para la producción en el mercado se estima en 100-250 dólares por m².

Estos precios accesibles hacen que los materiales cromogénicos sean más interesantes para los nuevos diseños y aplicaciones. Ya que los materiales cromogénicos tienen un efecto con un ciclo de vida limitado, se recomienda que se tome en cuenta para su rendimiento económico el ciclo de vida del material inteligente, por ejemplo la empresa Pleotint®, LLC creó una patente basada una tecnología de ventanas inteligentes por medio de vidrios termocrómicos, vidrios convencionales y gas aislante llamadas Suntuive, los cuales garantizan una duración en su efecto por más de 20 años, basados en pruebas de durabilidad interna, así como: 8,000 horas de pruebas de envejecimiento aceleradas y pruebas independientes en el Laboratorio Nacional de Energías renovables (Independent testing at the National Renewable Energy Laboratory (NREL)), La corporación Qlab, en el Laboratorio Nacional de Lawrence Berkley (Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)) y en la Incorporación de Pruebas Arquitectónicas (Architectural Testing, Inc (ATI)).

Al terminar el ciclo de vida del material inteligente, éste deberá de ser reemplazado por otro nuevo, de tal manera que se puede hacer un cálculo en el ahorro energético, puede ser en cuanto a ahorro en calefacción, ventilación y el uso de energía eléctrica para iluminación de un edificio con la tecnología inteligente incorporada para saber si el ahorro puede superar el costo del material y del reemplazo para que pueda ser conveniente económicamente la compra del material para el cliente.

3 | 8.2 TIPOS DE MATERIALES FOTOCRÓMICOS

I. Materiales Fotocromáticos Inorgánicos

A) Vidrio

El vidrio fotocromático es un material sensible a la luz que debe sus propiedades a las nanopartículas de plata. Aunque se han fabricado muchos tipos de vidrio fotocromático, los más conocidos son aquellos que se oscurecen al exponerse a la luz visible o ultravioleta de alta intensidad y recuperan

su transparencia cuando disminuye la intensidad de la luz. Los lentes fotocromáticos son ampliamente utilizadas en gafas de sol.

Muchos tipos de gafas muestran un pequeño cambio del ultravioleta en el borde de absorción hacia lo visible cuando están expuestas a la radiación solar. El fenómeno se conoce como "solarización"; sin embargo, es un efecto demasiado pequeño y lento para ser práctico y útil para el control de la energía solar.

Se puede producir un efecto fotocromático sustancial en el vidrio añadiendo ingredientes especiales a la masa fundida y mediante procedimientos adecuados de fusión y tratamiento térmico. En principio, es posible hacer uso de centros de absorción aislados en la matriz vítrea y procedimientos fotoelectrónicos, aunque hasta ahora ha sido difícil de preparar gafas que permiten un número suficiente de ciclos de iluminación de color, es decir, que están libres de fatiga. Otro enfoque más práctico de los vidrios fotocromáticos se basa en micro-estructuras no homogéneas con fases de compuestos fotosensibles dispersados aleatoriamente en la matriz vítrea. Fuertes efectos fotocromáticos se pueden producir usando haluros metálicos, especialmente con plata y cobre, como absorbente de la luz.

El fotocromismo basado en partículas de haluro de plata es conocido en numerosos vidrios ópticos, por ejemplo, en los aluminoboro-silicatos alcalinos, boratos alcalinos, boratos de plomo, boratos de lantano y aluminofosfatos. Es el aluminoboro-silicatos son los más ampliamente utilizados. Estos vidrios se funden junto con plata, cloro y iones de bromo agregados al orden de varias décimas de porcentaje en masa. La cantidad de iones halógenos excede la cantidad de iones de plata. El fotocromismo esencialmente libre de fatiga puede evolucionar cuando un vidrio de este tipo se trata térmicamente por encima de la temperatura de transición vítrea durante un tiempo adecuado, que puede ser de varias horas. Las partículas de haluro de plata que contienen algo de cobre se ocluyen a continuación en la matriz de vidrio mediante un complicado proceso de separación de fases. Su diámetro debe estar entre 10 y 20 nm para un fotocromismo máximo, dispersión de luz mínima y aceptable dinámico.

A efectos prácticos, las propiedades ópticas del vidrio fotocromático se rigen por la transmisión oscurecida y

compensada y por las velocidades de oscurecimiento y limpieza. Estos dependen de la composición del vidrio, y son posibles transmisiones claras hasta el 90%, o una transmitancia oscurecida de hasta el 5%. El fotocromismo es de alguna manera dependiente de la temperatura y el aumento de la temperatura proporciona una transmisión y una dinámica mejoradas. (Ver Figura 29)

restos pueden ser relativamente estables y recombinarse térmicamente para regenerar la molécula original. La división homolítica produce una reacción fotocromática al 23% en aproximadamente 1 minuto. La compensación es más lenta, y se tarda unos 20 minutos en recuperar la transmitancia total. La dinámica es mucho más rápida que para el vidrio fotocromático.

En un análisis realizado se muestra la radiación luminosa durante el oscurecimiento y el aclarado para dos vidrios fotocromáticos diferentes a dos temperaturas. Se ve que la irradiación luminosa se reduce rápidamente. En general, la oscilación a 80% del rango completo sucede en 1 minuto, pero se puede medir un oscurecimiento menor adicional por tiempos superiores a 1 hora. El aclarado en ausencia de irradiación progresa más lentamente que el oscurecimiento y está incompleto después de 1 hora. (Granqvist, 2006)

Transmitancia espectral en el rango de 0,35 λ <math><0,75</math> nm para la hoja en estados totalmente despejados y parcialmente oscurecidos. El oscurecimiento está asociado con la absorción a 0,5 λ <math><0,7</math> nm, que es análoga a la absorción en el vidrio fotocromático. El fotocromismo inducido por espirooxazina depende de la temperatura en una medida no deseada, y a 30 y 40 ° C el estado completamente oscurecido para el material corresponde a energía luminosa de 40 y 70%, respectivamente.

B) Plásticos

La coloración y el blanqueo (transparencia) de los plásticos fotocromáticos se puede entender, en la mayoría de los casos, en términos de cuatro procesos fotoquímicos diferentes, a saber: escisión heterolítica, escisión homolítica, isomerización cis-trans y tautomerismo. La escisión heterolítica se estudia más ampliamente y se produce en espiropiranos, espirooxazinas, triarilmetanos, etc.

Las sustancias fotocromáticas discutidas hasta ahora son todos materiales a granel. Los recubrimientos fotocromáticos son de posible interés, y algunos esfuerzos de desarrollo han sido reportados en la literatura. Por lo tanto, se discuten revestimientos inorgánicos que incluyen haluros de plata y revestimientos de espiropirano pirolizados con plasma orgánico.

En las sustancias mencionadas, la foto-activación rompe un enlace heterolítico de una molécula para formar restos cargados que pueden existir como iones aislados o pueden estar conectados a otros enlaces químicos. Estos

Debido a que el vidrio reacciona de manera diferente a la luz de diferentes longitudes de onda, se puede lograr un cambio en la transmitancia del vidrio de dos maneras: oscureciendo el vidrio con luz de onda corta o blanqueándolo, después de que se ha oscurecido, con luz más larga. Cualquiera de estos se puede hacer en cualquier patrón geométrico



Figura 29. Esquema de funcionamiento de un lente fotocromático al estar expuesto a la radiación visible y ultravioleta de Weetect (WeeTect, 2016).

deseado; las matrices cuadradas de puntos de 1 mm de diámetro hechas por irradiación con luz ultravioleta y por blanqueo con luz de longitud de onda más larga (6000 Å). El desvanecimiento térmico, que se produce de manera continua, afecta los resultados tanto para el oscurecimiento como para el blanqueamiento, por lo que el número y es una función de la temperatura.

Lentes fotocromáticos de vidrio o plástico

Los lentes fotocromáticos fueron inventados por William H. Armistead y Stanley Donald Stookey de Corning Glass Works en los años 1960. En aquel tiempo, el cristal fotocromático funcionaba un poco como las cintas de película fotográfica. La película se oscurece porque contiene cristales a base de plata que se agrupan cuando la luz cae sobre ellos. Los primeros lentes fotocromáticos contenían cristales de plata similares y se oscurecían de forma similar: cuando la luz los golpeaba, algunos de los cristales de plata se transformaban en pedazos microscópicos de plata. ¿Cómo se puede ver a través de lentes hechos con plata opaca? Como Armistead y Stookey explican la patente original, solo se necesitan pequeñas cantidades de cristales de plata, y cada cristal tiene menos de 0.1 micras de diámetro. Película fotográfica no alineada que se oscurece permanentemente, las lentes fotocromáticas podrían volver a cambiar y desaparecer cuando el nivel de luz vuelva a la normalidad. En 1970, la compañía británica de vidrio Pilkington ayudó a popularizar las lentes fotocromáticas mediante la introducción de marcas llamadas Reactolite y Reactolite Rapide.

Lentes fotocromáticos modernos tienden a ser un plástico y en vez de químicos de plata, contienen moléculas orgánicas (base de carbón) llamadas naphopyranos que reaccionan a la luz en una manera diferente: sutilmente cambian su estructura molecular cuando la luz ultravioleta incide sobre éstos en esta forma alterada, absorben más luz cuando intenta pasar (técnicamente decimos que tienen un espectro de absorción diferente), que es lo que hace que las lentes se oscurezcan. Muchas moléculas se oscurecen repentinamente dentro de una lente transparente. Es como cerrar las persianas frente a su ventana en un día soleado: cuando las láminas giran, bloquean progresivamente más y más luz.

Se podría pensar que tomaría bastante tiempo en reaccionar, pero los lentes fotocromáticos responden notablemente

rápido. Aproximadamente la mitad del oscurecimiento ocurre dentro del primer minuto y tienen la capacidad de absorber o reflejar aproximadamente el 80% de la radiación solar en 15 minutos.

Lentes fotocromáticos de plástico contra lentes fotocromáticos de vidrio:

Las moléculas de lente de plástico fotocromático de plata y haluro generalmente se colocan en capas o se incrustan uniformemente en la superficie de la lente, proporcionando un tono uniforme de tinte al oscurecerse.

Los lentes fotocromáticos de vidrio tienen las moléculas contenidas dentro del vidrio y esto a veces puede causar un efecto de tinte desigual en una lente con una prescripción más alta debido a los diferentes espesores de la lente de un borde al otro.

Los inconvenientes de lentes fotocromáticos

Desafortunadamente, se necesita más tiempo para revertir el efecto de coloración. Generalmente, transmiten al interior la radiación solar al 60% después de 5 minutos. Sin embargo, se necesita aproximadamente una hora para que se decoloren completamente. Los lentes fotocromáticos sorprendentemente se oscurecen más o menos cada vez que están expuestos al exterior sin necesitar de un día soleado, porque reaccionan a luz ultravioleta y se puede encontrar en el ambiente hasta en días nublados.

Aunque la marca de lentes Transition® logró que sus lentes fotocromáticos reaccionaran a los rayos UV oscureciéndose generalmente entre 30 y 60 segundos, con una inversión a transparente que le lleva un poco más de 5 minutos dependiendo de la temperatura del lente.

Un inconveniente más serio es que las moléculas reaccionan también a la temperatura y luz; se vuelven más oscuros en condiciones más frías. Esto significa que los vidrios tienen un efecto más intenso en invierno (cuando probablemente no se necesita) y funcionan con menos intensidad en verano (cuando la eficiencia del material es más necesitada). Este efecto de temperatura puede ser un gran problema por ejemplo en el uso de parabrisas fotocromáticos cuando un vehículo se encuentran en condiciones frías y nevadas.

Otro problema relacionado con el uso de vidrios fotocromicos en la industria automotriz es porque los parabrisas de vidrio convencionales protegen de forma natural la mayor parte de la luz ultravioleta. Eso significa que los conductores realmente necesitan un segundo par de gafas de sol tintadas o polarizadas solo para conducir. En consecuencia se ha lanzado al mercado una nueva lente que puede reaccionar dentro de un automóvil o detrás del parabrisas sin rayos UV y utiliza la luz del sol para desencadenar la reacción. Estas lentes se conocen como "lentes de conducción de transición" que combinan tecnología fotocromica y de polarización. Éste problema podría ocurrir en una fachada sin exposición a la radiación UV directa constante; los lentes fotocromicos no neutralizan el deslumbramiento debido a superficies reflejantes, pero un lente polarizado sí.

Los lentes de conducción de transición se inventaron para su uso en el automóvil mientras se conduce y ofrecen una protección completa contra el resplandor del sol durante el día, lo que los hace perfectos para usar mientras conducen. Otra de las dificultades es que los materiales fotocromicos no tienen un efecto ilimitado. Después de 3 años aproximadamente de un continuo cambio entre oscurecerse y aclararse, empieza a disminuir notablemente el efecto. Esto podría ser un problema menos grave para la industria de lentes fotocromicos ya que la gente normalmente cambia sus lentes cada 3 años, sin embargo en un edificio, no se cambian los vidrios de una fachada tan seguido.

Los lentes fotocromicos son realmente plásticos que cambian de color con un efecto reversible. Muchos lentes convencionales pueden cambiar de color con la luz, pero no tienen un efecto reversible. Algunos plásticos se vuelven opacos gradualmente con el tiempo, el color "blanco" se vuelve poco a poco en amarillo. Este efecto es conocido como foto-degradación y es causado por las ondas infrarrojas y ultravioletas, las cuales cortan grandes moléculas plásticas en pedazos más pequeños.

II. Materiales Fotocromicos Orgánicos

A) Tintes

Un ejemplo de esta clase es un tinte de triphenil metano, que se oxida con luz energética; las características de absorción del ion positivo así formado son diferentes de las de los anillos de benceno eléctricamente neutros originales. (Ver Figura 30)



Figura 30. Tinta fotocromica, al ser expuesta a radiación Ultravioleta o visible emite un color. (Sinkrolnk, 2009).

B) Estereoisómeros

Uno de los enlaces químicos en una molécula de anillo se rompe por la energía de la luz absorbida, lo que permite que la molécula se desenrolle en una disposición geométrica diferente. El proceso inverso es una reorganización en el enlace. Los dos estados absorben la luz de manera diferente. Los espiropyranos y anils son ejemplos de esta clase.

C) Estados de trillizos

Las moléculas de hidrocarburos aromáticos polinucleares se excitan por irradiación primero desde el estado fundamental a un estado singlete, y luego pasan, a través de el estado de triplete más bajo, a un estado de triplete excitado. La luz visible se absorbe en la transición trío-triplete.

III. Materiales fotocromicos Orgánicos e Inorgánicos

A estas clases principales de fotocromos orgánicos se les deben agregar varios tipos de compuestos inorgánicos: sulfuros alcalinotérreos; sulfuro de cinc (lithopone, observado en 1881); Titanato y titanato alcalino; varios compuestos de mercurio. Muchos de estos parecen requerir rastros de un metal pesado, o un halógeno, para ser fotocromicos.

En todos estos, la respuesta fotocromica dependerá de la intensidad y el carácter espectral de la luz incidente, parámetros ambientales tales como temperatura, matriz de soporte o disolvente y, en la mayoría de los casos, antecedentes previos. Este último se llama fatiga, un cambio en el comportamiento ya sea con el uso o con el tiempo de almacenamiento.

Es importante observar, en la discusión de los materiales fotocromicos, que, si la reacción es verdaderamente reversible, el rendimiento cuántico será igual o menor a uno. Esto se debe comparar con un rendimiento de varios órdenes de magnitud mayor para la fotografía de haluro de plata ordinaria, en la cual la energía se agrega químicamente al sistema durante el desarrollo. Los procesos fotocromicos son muy "lentos", en el sentido fotográfico, en comparación con la película fotográfica. Pero estos materiales sensibles a la luz son únicos en el sentido de que no requieren procesamiento para desarrollar una imagen latente, y son, en diversos grados, reversibles y reutilizables. (Smith, 2006)

3 | 8.3

MATERIALES

FOTOCRÓMICOS COMERCIALES

En 1966, Corning, NY (EE. UU.) Comercializó lentes oftálmicas fotocromicas que se oscurecieron de forma reversible a la luz solar debido a los cristales de haluro de plata atrapados dentro de la matriz del vidrio. Desde entonces, se han prescrito millones de pares de gafas fotocromicas inorgánicas que incorporan esta tecnología: el fotocromismo.

Los materiales fotocromicos orgánicos, por otro lado, aunque dominan las publicaciones de investigación científica, han aparecido relativamente menos en aplicaciones industriales comerciales en su temprana edad. Sin embargo, con el rápido desarrollo de polímeros industriales como los plásticos, los compuestos fotocromicos orgánicos han encontrado sus ventajas en la construcción de materiales fotocromicos comerciales con mayor robustez, ligereza y menor costo, lo cual es esencial para la comercialización. Por lo tanto, los materiales fotocromicos orgánicos se han convertido en una de las industrias químicas finas en auge en las últimas dos décadas.

Para que un material fotocromico sea considerado un material eficiente para su comercialización debe de cumplir con ciertas características físicas dentro de su composición, según el autor Zhang J., et. al. Un material fotocromico debe de tener las siguientes características:

Buena fatiga: buena fotoestabilidad para garantizar el reciclaje del producto (excepto algunas desechables como las etiquetas de seguridad). Los materiales fotocromicos con éxito tienen propiedades de fatiga intrínsecamente bajas y responden bien a la presencia de estabilidades.

Termoestabilidad: esto significa que los dos fotoisómeros en sí muestran pocos cambios en el fotocromismo con la variación de las temperaturas.

Buena solubilidad y maleabilidad: excepto por estos criterios antes mencionados, aún se deben considerar muchos factores complicados durante la fabricación industrial. Tome la matriz polimérica, por ejemplo, ya que los compuestos fotocromicos de tipo T a menudo experimentan cambios estructurales sustanciales tras la fotoisomerización, la rigidez de la matriz polimérica junto con la polaridad afecta significativamente la cinética fotocromica. Generalmente, los polímeros con capas flexibles y bajas temperaturas de transición vítrea son el mejor candidato en la industria fotocromica. Las capas de carga de tinte fotocromico para los comportamientos fotocromicos más eficientes y duraderos dependen de diferentes medios, aplicaciones y tintes. Sin embargo, una cosa es igual, el colorante en alta concentración será perjudicial para el rendimiento de los productos.

También un buen comienzo es la mitad de la batalla. Por lo tanto, la optimización desde el nivel básico debe centrarse en el diseño molecular. Recientemente, Momoda et al. Han informado que la introducción de grupos donantes de electrones en el esqueleto de naftopirano, un material de lentes fotocromicas tradicionales, ha llevado al desarrollo del desplazamiento batocromico de la MC (merocianina) desde la banda de absorción hacia la longitud de onda más larga. La investigación exhaustiva y detallada sobre síntesis molecular y diseño proporcionaría más orientación sobre el desarrollo de nuevas moléculas fotocromicas, que de hecho serán rentables para la industrialización diaria (Zhang, 2016).

En la actualidad, los lentes oftálmicas fotocromicas comerciales de tipo T han representado el mayor uso de volumen en la industria fotocromica. Generalmente, hay cuatro tecnologías de fabricación para producciones de lentes fotocromicas.

En masa: los tintes se moldean por inyección en un termoplástico o se disuelven en un monómero o sistema de resina que luego se cura térmicamente o con UV en una lente semi-acabada que se puede moler a la prescripción deseada.

Recubrimiento: los colorantes se recubren en la cara frontal o posterior de una lente en solución junto con una resina mediante una técnica como el recubrimiento por centrifugado o por inmersión.

Imbibición: Se forma una capa fotocromática de aproximadamente 0,2 mm de espesor en la superficie de la lente al permitir que el colorante se difunda en la matriz del polímero.

Laminación: una película que contiene los colorantes fotocromáticos está intercalada entre los dos lados de una lente.

Además de las gafas de sol ordinarias para la vida cotidiana, ha salido a la luz la reciente innovación en gafas de sol comerciales fotocromáticas para conductores. El tono de las gafas cambia a diferentes colores dependiendo del clima que están expuestos bajo la luz solar natural o la luz filtrada a través del parabrisas del automóvil. (Ver Figura 31)

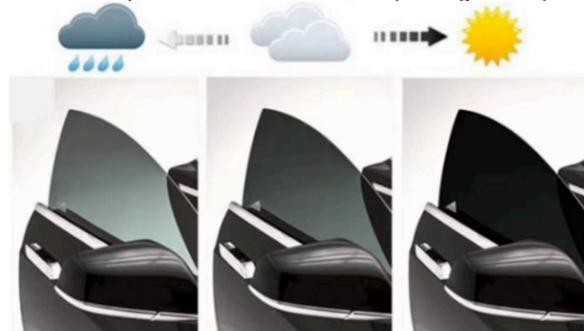


Figura 31. Película fotocromática para uso en la industria automotriz, para evitar el deslumbramiento, por Dynamic Glass Products .

Recubrimientos superficiales fotocromáticos, incluyen tintas, esmalte de uñas, impresiones de seguridad, las cuales tendrían que convertirse en una realidad comercial más popular para las aplicaciones en estética, seguridad y autenticación. El método más simple para aplicar tintes fotocromáticos al revestimiento es disolverlos en un barniz brillante a base de solvente, comercialmente disponible. Este método solo está disponible para orgánicos disolventes (ya que los colorantes fotocromáticos son principalmente orgánicos solubles).

La banda de absorción está centrada en el rango medio-luminoso, lo que permite disminuir la radiación luminosa en mayor medida que radiación solar. La transmitancia disminuye monótonamente con el aumento de la intensidad de irradiación. En el estado decolorado, la transmitancia puede ser tan grande como para el vidrio normal. Sin embargo, también es posible fabricar vidrio con una transmisión moderada, digamos 50%, en condiciones completamente decoloradas. Se necesita unos minutos para pasar del estado completamente decolorado (transparente) al completamente coloreado; el proceso inverso puede requerir decenas de minutos. El plástico fotocromático es una alternativa al vidrio fotocromático. El plástico tiene propiedades ópticas comparables, dinámica superior, pérdida de fotocromismo desfavorable a temperaturas elevadas y durabilidad desconocida a largo plazo.

Los materiales fotocromáticos orgánicos son compatibles con plásticos comunes. Por lo tanto, se pueden disolver en pinturas convencionales, películas, lacas y tintas para convertirlas en fotocromáticas. Los termoplásticos fotocromáticos tales como poli (cloruro de vinilo), celulósicos y acrílicos se pueden preparar mediante moldeo con disolvente, moldeo por inyección, extrusión y polimerización a partir de monómeros. (Ver Figura 32)

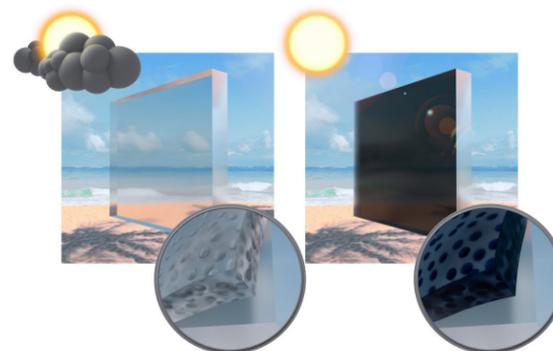


Figura 32. Película fotocromática para uso en fachadas, para regular el ambiente luminoso por NanosFun, 2020 .

Desde su descubrimiento, los compuestos fotocromáticos orgánicos han estado plagados de falta de estabilidad. Esta propiedad es causada principalmente por reacciones secundarias que son inducidas térmicamente o fotoquímicamente. Recientemente se han realizado estudios detallados de compuestos de espirooxazina que han demostrado que se puede lograr una muy buena estabilidad contra la foto-degradación, y por lo tanto, tales compuestos pueden ser útiles para el control de la transmitancia de las ventanas eficientes energéticamente en el futuro.

El fotocromismo de las espirooxazinas está conectado con la escisión heterolítica y la re- formación del enlace simple carbono-oxígeno del anillo de oxazina. Además, la conformación de la molécula cambia a una configuración plana después del corte del enlace. (Zhang, 2016)

Debido a que los materiales fotocromáticos presentan variaciones en sus propiedades, se realizaron investigaciones de las propiedades de los materiales inorgánicos con un enfoque en glaucomas fotocromáticas, de materiales orgánicos con un enfoque en los compuestos fotocromáticos de espirooxazina.

Respuesta a la luz del sol

Las medidas en gafas fotocromáticas se realizaron con fuentes artificiales y controladas ricas en luz ultravioleta. La luz del sol, en la superficie de la tierra, se puede considerar como una fuente de luz descontrolada con la cantidad de luz ultravioleta, y la proporción de luz ultravioleta a luz visible, que cambia constantemente a lo largo del día y con el clima cambiante.

Para la mayoría de los usos en la luz del sol, elegiríamos gafas en las que la velocidad de desvanecimiento térmico se haya hecho relativamente grande; de modo que la absorbancia de equilibrio aumenta con la intensidad a valores de intensidad tan grandes como sea posible; la absorbancia disminuye tan rápidamente como sea posible cuando la iluminación pasa a valores muy bajos, es decir, de noche. Pero, dado que se esperaría que la velocidad de decoloración fuera dependiente de la temperatura, esto implica una composición de vidrio cuya transmitancia, en mayor medida, está determinada por la temperatura del vidrio.

Un vidrio típico que tiene un equilibrio favorable de varios parámetros fotocromáticos para su uso en edificios muestra una reducción de la transmitancia con el aumento de la intensidad solar durante tres mañanas de diferente temperatura ambiente. Estas curvas muestran el aumento esperado en la transmitancia de equilibrio con la temperatura, y también el aumento en la intensidad de la iluminación a la que se acerca el equilibrio, a la temperatura más alta. (Ver Figura 33)



Figura 33. Vidrio fotocromático a lo largo del día por Smart Glass VIP. (<https://smartglassvip.com/photochromic-smart-light-control-film/>)

Cuando las transmitancias de estas gafas fotocromáticas se registran durante todo un día, muestran un patrón característico: comienzan a oscurecerse al amanecer (en realidad antes del amanecer debido a la luz ultravioleta dispersada por la atmósfera en las gafas), continúan oscureciéndose hasta se logra la saturación, permanezca aproximadamente a esa transmitancia a lo largo del día, comience a despejarse antes de la puesta del sol, y continúe esta limpieza a una tasa de reducción constante hasta el amanecer de la mañana siguiente, cuando se repita el patrón (Woodford, 2016).

En vidrios seleccionados de 6 mm de espesor, en donde la temperatura no estaba controlada externamente; la temperatura era la temperatura de equilibrio para estas gafas montadas en un panel vertical orientado hacia el sur. A medida que aumenta la intensidad de la luz solar, aumenta la absorbancia del vidrio. Pero a intensidades solares lo suficientemente altas como para producir un aumento apreciable de temperatura en el vidrio, la tasa de cambio de absorbancia con intensidad es pequeña, y puede cancelarse por la disminución de la absorbancia de equilibrio resultante del aumento en la tasa de desvanecimiento térmico del vidrio.

Se sigue, entonces, que los cambios en la intensidad producen cambios en la transmitancia a valores de intensidad más altos cuando se controla la temperatura del vidrio. La transmitancia de un vidrio fotocromático seleccionado, doble acristalamiento con vidrio de placa de cal sodada como una ventana en una habitación con aire acondicionado, frente a la intensidad de la luz solar para un día típico. En este día de verano, el rastro de la luz incidente muestra una mañana razonablemente brillante, una nube pesada alrededor de las 10.00 h, nubes variables y sol a primera hora de la tarde y una tarde relativamente clara. La traza correspondiente de transmitancia muestra el oscurecimiento del vidrio desde el amanecer hasta alrededor de las 07.00 h, con un aclarado

después de aproximadamente las 17.00 h. El vidrio se borra de aproximadamente 40 a 52% de transmitancia con la nube pesada a las 10.00 h, lo que redujo la iluminación, medida de forma normal al vidrio. La respuesta al cambio de intensidad de la luz incidente, resultante de una nube, también se observa justo antes de las 13.00 h.

Un vidrio similar aumenta la transmitancia de 30 a 57 % durante una tormenta muy severa, cuando la iluminación externa disminuyó. Por lo tanto, la luz transmitida, cuando se volvió relativamente muy oscura en el exterior, era aproximadamente el doble de la que admitiría una ventana de transmitancia fija de 30%, como una ventana gris que absorba la luz (Smith, 2006).

Mejorar el tiempo de conmutación mediante el desarrollo de nuevos materiales es un enfoque. Sin embargo, el enfoque prometedor es el desarrollo de sistemas híbridos que integran algún tipo de tecnología de ventanas inteligentes activas con materiales fotocromáticos para abordar el problema del oscurecimiento automático durante los días fríos y soleados. La combinación adecuada puede agregar control de usuario para explotar el efecto fotocromático automático según sea necesario para hacer un producto más vendible.

Un ejemplo es la tecnología de película híbrida fotocromática / electrocromática de SWITCH Materials para aplicaciones de automoción. En la actualidad, las películas fotocromáticas se producen y suministran en gran medida en el sudeste asiático y no son muy atractivas en Europa y Estados Unidos. Una tecnología híbrida más avanzada como la ofrecida por SWITCH Materials debe tener un mejor valor de mercado en estas ubicaciones.

Otro ejemplo es la tecnología híbrida fotocromática / electrocromática desarrollada por Fraunhofer ISE. El sistema produce una ventana fotocromática mediante la integración de trióxido de tungsteno electrocromático y una capa de colorante de célula solar (DSC). Fraunhofer ISE dice que la nueva tecnología es ideal para aplicaciones de construcción y automotrices. El DSC puede servir como la fuente de energía del sistema. Sin embargo, el tiempo de conmutación es más largo especialmente para revertir el proceso de oscurecimiento. Según NanoMarkets, el rendimiento de esta tecnología debe mejorarse para crear un producto comercialmente viable. (Ver Figura 34)

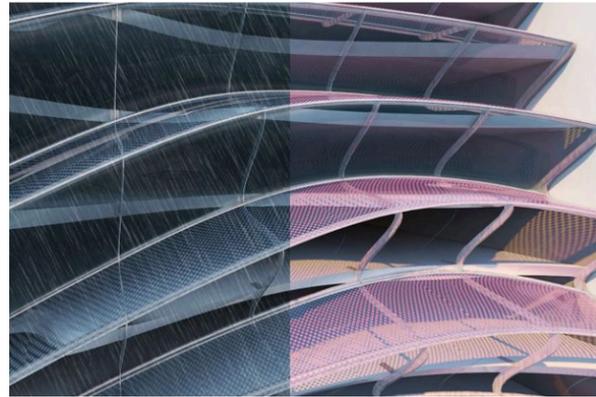


Figura 34. Sistema de fachada inteligente que utiliza agentes fotocromáticos para lograr sombreado pasivo (Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña, 2014) .

NanoMarkets espera un menor crecimiento para las ventanas puramente fotocromáticas en los próximos ocho años, pero predice mejores oportunidades para los híbridos. Las ventanas híbridas fotocromáticas / electrocromáticas deben tener su capacidad para que los clientes tengan éxito. SWITCH Materials afirma las ventajas del oscurecimiento automático cuando un vehículo está estacionado bajo el sol y el control del usuario para una conducción cómoda. No obstante, agregar control electrónico también aumenta el costo (NanoMarkets, *Opportunities for Photochromic Materials in the Smart Windows Market*, 2014).

Además, los materiales fotocromáticos requieren una fuente de alimentación cuando se utilizan en un sistema híbrido, perdiendo así la ventaja de ser una tecnología pasiva. No obstante, como lo demostró Fraunhofer, este requisito podría cumplirse utilizando un panel solar de bajo costo. Los materiales que exhiben algún tipo de fotocromismo son objeto de intensas investigaciones en todo el mundo, allanando el camino para que otras empresas compitan en este espacio. Sin embargo, probablemente no sea suficiente tener un material fotocromático con un tiempo de conmutación rápido.

REFERENCIAS

- Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies*. Oxford: Architectural Press.
- Tilley, R. J .D. (2011). *Colour and the Optical Properties of Materials*. Chichester: Wiley & Sons.

Elkadi H., (2006) *Culture of Glass architecture*. NYC: Ashgate Publishing.

Ferrara, M., Bengisu, M. (2014). *Materials that change color*. Milano: Politecnico di Milano, Springer.

Zhang J., Tian H., (2016). *Photochromic materials, preparation, properties and applications*, Weinheim: Wiley - VCH.

Granqvist C. G. Ph.D, (2006) *Chromogenic materials for transmittance control of large area windows*, Artículo.

SMITH G., (2006) *Photochromic Glasses: Properties and Applications* International Research, Technical Staffs Division, Coming Glass Works, Coming, New York, USA .

Woodford C., (2016). *Atoms under floorboards: the surprising science hidden in your home*, London: Bloomsbury Publishing Plc.

Nanomarkets, *Opportunities for Photochromic Materials in the Smart Windows Market*, article, Virginia, USA, 2014.

Al analizar los materiales fotocromáticos que existen en el mercado podemos decir que tiene mucho potencial para su uso en edificaciones arquitectónicas, ya que es un material que tiene la capacidad de adaptarse por sí solo a las condiciones externas que se presenten, creando un ambiente lumínico más favorable al interior para el desarrollo de actividades basados en el sistema visual del ser humano.

Actualmente, países europeos han realizado estudios y análisis del material fotocromático para su uso en sistemas constructivos, sin embargo, el material presenta algunas fallas al estar expuesto a temperaturas extremas, sobre todo al frío extremo, en el cuál evita las ganancias de calor en periodos invernales al opacarse. Por ende, ha sido descartada de su implementación en arquitectura.

Mientras que en algunas zonas de México, el clima suele ser más templado y puede proporcionar un ambiente favorable para el material. Ya que el material puede ser capaz de regular la luz dependiendo de la presencia de luz visible y ultravioleta en el ambiente sin necesidad de considerar la temperatura exterior como en Ciudad de México.

Empresas Europeas, Norte Americanas y Asiáticas están presentes en el mercado de los materiales fotocromáticos, cuando las zonas dónde se puede implementar de manera más efectiva el uso del material, cerca del ecuador: Centro, Sudamérica, África y unas partes de Asia.

México podría impulsar su economía apostándole a energías limpias, materiales constructivos que aprovechen la energía que está presente en el medio ambiente. Podría ser uno de los pioneros en Latinoamérica que utiliza materiales

fotocromáticos para sistemas pasivos en edificaciones sustentables.

Para poder evaluar en un diseño arquitectónico si el material fotocromático puede ser eficiente hay que considerar los siguientes puntos:

- La ubicación geográfica.
 - La cantidad de luz que incide en la superficie durante un día y una hora específica.
 - La orientación del objeto arquitectónico.
 - Los valores de reflectancia de los acabados interiores.
 - Los valores de transmitancia de las superficies acristaladas.
 - Los requerimientos de los niveles del factor de luz diurna según las actividades a desarrollar en el espacio.
 - Los ángulos de incidencia de la radiación solar durante un periodo específico.
 - La relación entre el vano y el macizo. Aperturas en el objeto arquitectónico.
 - El radio de contraste entre las superficies verticales acristaladas y las superficies verticales y horizontales opacas.
 - El periodo de vida del material inteligente con efecto fotocromático.
 - La comparación de costos entre materiales convencionales y no convencionales contra el ahorro energético en iluminación artificial a largo plazo.
- Los factores mencionados son fundamentales para el análisis del uso de un material fotocromático para la construcción de un objeto arquitectónico.

El deslumbramiento por contraste de luminancia puede ser regulado considerando los puntos anteriores. Por medio

de estrategias de diseño es posible regular los niveles de luminancia teniendo como resultado un ambiente óptimo para el sistema visual del ser humano.

Nuestra labor consiste en el aprovechamiento de sistemas pasivos con base en las estrategias de diseño como volumetría, acabados, aperturas permitiendo un intercambio de energía entre el interior y el exterior, usando la radiación de manera eficiente, se puede aprovechar para disminuir la necesidad de luz artificial, sistemas activos que consumen energía eléctrica para la iluminación de espacios y superficies.

Así podemos seleccionar que muros, pisos, techos específicamente se les puede elevar su reflectancia para tener mejores condiciones lumínicas y de iluminación tomando en cuenta todos los factores que intervienen en la generación del ambiente lumínico en un espacio.

En el diseño de sistemas de iluminación natural arquitectónico, no sólo se deben de tomar en cuenta los elementos arquitectónicos, sino también factores físicos, como son las propiedades de los materiales transparentes y opacos de los espacios (ventanas, muros, pisos, techos) Mediante el aprovechamiento de las nuevas tecnologías como los materiales inteligentes se puede aprovechar la energía solar para iluminar adecuadamente el interior de los edificios, tomando en cuenta necesidades del sistema visual del ser humano durante el transcurso del día considerando la luz como un material esencial en el diseño arquitectónico. (Ver Figura 35)

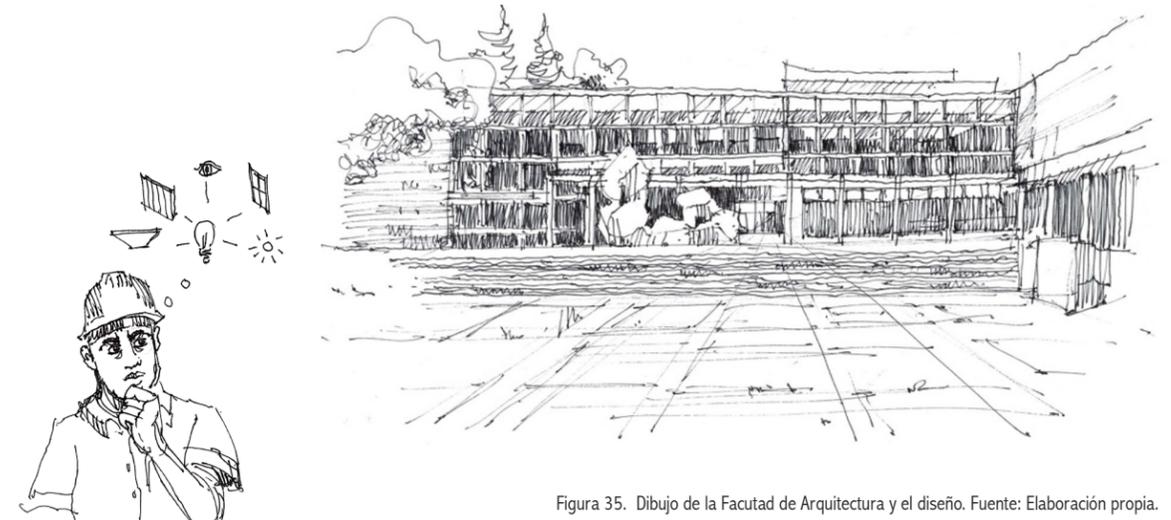


Figura 35. Dibujo de la Facultad de Arquitectura y el diseño. Fuente: Elaboración propia.

- Addington, M., Schodek, D. (2005). *Smart materials and new technologies*. Oxford: Architectural Press.
- Tilley, R. J. D. (2011). *Colour and the Optical Properties of Materials*. Chichester: Wiley & Sons.
- Elkadi H., (2006) *Culture of Glass architecture*. NYC: Ashgate Publishing.
- Ferrara, M., Bengisu, M. (2014). *Materials that change color*. Milano: Politecnico di Milano, Springer.
- Zhang J., Tian H., (2016). *Photochromic materials, preparation, properties and applications*, Weinheim: Wiley - VCH.
- Granqvist C. G. Ph.D, (2006) *Chromogenic materials for transmittance control of large area windows*, Artículo.
- SMITH G., (2006) *Photochromic Glasses: Properties and Applications* International Research, Technical Staffs Division, Coming Glass Works, Coming, New York, USA .
- Woodford C., (2016). *Atoms under floorboards: the surprising science hidden in your home*, London: Bloomsbury Publishing Plc.
- Nanomarkets, *Opportunities for Photochromic Materials in the Smart Windows Market*, article, Virginia, USA, 2014.
- Lechner, N., (2015) *Heating, Cooling, Lighting, Sustainable Design Methods for architects*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Pollo, R. (2015). *Progettare l'ambiente urbano: Riflessioni e strumenti*. Roma: Carocci editore S.p.A. Studio Agostini.
- Ruck, N. (2000). *Daylight in Buildings: A Source Book on Daylighting Systems and Components*. Washington: International Energy Agency (IEA) Solar Heating and Cooling Programme Task 21.
- Illuminating Engineering Society (IES, 2020).
- Organización de las Naciones Humanas (Enero,2019) *Cambio Climático*. Recuperado de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- EMB Construcción (Octubre, 2012) *Metecno*. Recuperado de <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=1961&edi=92&xit=edificios-son-responsables-de-hasta-un-35-de-las-emisiones-de-co2-a-nivel-mundial>
- MBC Aries. (2013). *Daylight and health: A review of the evidence and consequences for the built environment. Eindhoven: The society of light and lighting*, artículo,
- Mark Rea, *The IESNA Lighting Handbook* (New York: IES, 2000)

