

Espejos, arte, diseño y tecnología: una propuesta para la enseñanza de la óptica geométrica en la carrera de Diseño Industrial

Miralles¹⁻², Mónica; Borches¹, Ailén; Kessler¹, Adriana
mmralles@gmail.com; aborches1@gmail.com;
adriana.ines.kessler@gmail.com

¹Universidad de Buenos Aires. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Cátedra de Física Ex -Denegri. CABA. Argentina.

²Pontificia Universidad Católica Argentina. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias. Laboratorio de Biomecánica e Ingeniería para la Salud. CABA. Argentina.

Línea temática 1. Palabras, campo, marco

(Conceptos y términos en la definición teórica de las investigaciones)

Palabras clave

Óptica, Espejos, Reflexión, Color, Diseño industrial

Resumen

La palabra espejo denota, no solo a un artefacto tecnológico con peculiares modos de ser, sino a toda una familia léxica que se fue complejizando y dando lugar a múltiples y trascendentes connotaciones.

El espejo es un instrumento óptico formador de imágenes de diferentes características, dependiendo si se trata de uno plano, esférico, cilíndrico, cónico, a-esférico, entre otros.

Sus capacidades reflexivas de la luz los incluyen en el diseño de muchos sistemas ópticos complejos. En las últimas décadas, la exploración astronómica (por ej. el telescopio Hubble) ha impulsado un

sofisticado desarrollo tecnológico destinado a este tipo de instrumentos, algunos de los cuales están formando las primeras imágenes de las rocas marcianas.

El presente trabajo se desarrolla en el marco del proyecto "La interacción del color, iluminación y nuevas formas de enseñar óptica geométrica a estudiantes de diseño industrial" (PII TRP-10). El objetivo es introducir nuevas formas de enseñanza de los contenidos de óptica (geométrica y física) a los alumnos de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de Buenos Aires (FADU-UBA).

Se presentan en este trabajo: a) una revisión de este singular producto desde una mirada proyectual y b) una propuesta de diferentes situaciones didácticas que se consideran pertinentes desde una postura constructivista. Dichas situaciones son desarrolladas a partir de producciones originadas en el arte, el diseño industrial, la ciencia y la tecnología. El objetivo es, no solo lograr el aprendizaje de los contenidos mínimos, sino también contribuir mediante la integración de los mismos, al enriquecimiento del pensamiento cultural y físico-proyectual de los alumnos.

Introducción

El alumno de diseño industrial debe adquirir flexibilidad para adaptarse a los cambios dados por la permanente introducción de nuevas tecnologías, ser capaz de comprender la bibliografía consultada y desarrollar una creciente capacidad de observación que le permita mejorar, innovar o crear diseños utilizando sus conocimientos en situaciones diferentes a aquellas en las que fueron aprendidos.

La carrera cuenta con dos asignaturas en el área de Física: Física I y Física II, las cuales, a pesar de su naturaleza fáctica, no cuentan para su dictado con un laboratorio en el cual los alumnos puedan reproducir los fenómenos físicos, realizar observaciones y mediciones. Los alumnos llegan a las materias con conocimientos matemáticos muy endebles y, para muchos de ellos, es su primer contacto con el pensamiento físico.

Las dificultades presentadas por los alumnos para la comprensión y aprobación de estas asignaturas condujeron a la presentación del proyecto "La interacción del color, iluminación y nuevas formas de enseñar óptica geométrica a estudiantes de diseño industrial" (PII TRP-10).

La elección del contenido de Física II (materia del ciclo superior) para este proyecto está ligado a dos ejes considerados estratégicos: el de la óptica geométrica y el de la teoría del color. La elección se basa en la necesidad de partir de fenómenos fácilmente visualizables por los alumnos. Por otro lado, despertar su interés y curiosidad para poner en juego herramientas cognitivas intensamente ejercitadas en el análisis de formas y morfologías en cursos previos. Los objetivos generales son: a) forjar una estrategia para la enseñanza–aprendizaje de los contenidos del área Física, acorde al nuevo plan de estudios de la carrera, desde el punto de vista de las teorías constructivistas, b) la detección y remoción de preconcepciones y errores conceptuales previos que operan como obstáculos para el aprendizaje, c) la producción de materiales para el dictado de los cursos en el grado y d) la validación de los resultados según el modelo estadístico diseñado. Es decir, entre otros objetivos específicos, se busca desarrollar actividades didácticas concretas para la enseñanza integral de contenidos de la óptica geométrica y de la teoría del color que permitan la generación de un pensamiento productivo, y no reproductivo, que es el ligado, habitualmente, a “problemas tipo”, que favorecen el fracaso en situaciones novedosas.

La pandemia de COVID-19 hizo que la única modalidad de enseñanza desde marzo de 2020 sea virtual, lo cual no estaba contemplado en el proyecto original. Lo presentado en este trabajo se basa en las actividades desarrolladas durante 2020 y primer cuatrimestre de 2021, adaptadas a esta modalidad. El trabajo se divide en dos partes: la primera (Parte I) presenta los conceptos centrales a trabajar con los alumnos y la segunda (Parte II) la propuesta metodológica y algunos resultados.

Parte I: Física de la reflexión y preconcepciones

La física de la reflexión es un campo bien constituido donde las primeras superficies que se estudian en los cursos de física son las pulidas, es decir los espejos, para pasar, luego, a los fenómenos de refracción (dioptras), de formación de imágenes (lentes) y, finalmente, a principios de diseño de sistemas ópticos más complejos (microscopio, antejo astronómico/telescopio, cámaras réflex, entre otros). Estos conocimientos están estrechamente relacionados a la segunda parte del curso que trata sobre óptica física, ondas mecánicas (sonido/diseño acústico) y diseño de iluminación.

La experiencia especular es ancestral y el autoconocimiento a partir de las reflexiones es una facultad cuasi exclusiva de los primates superiores o de contadas especies. Es una experiencia compleja, ya que, involucra la construcción del concepto de realidad, de percepción visual y de pensamiento. Por ello, y dada la importancia que tiene la visión en el conocimiento del mundo, es frecuente que los alumnos lleguen con muchas preconcepciones que no han sido mínimamente removidas en cursos anteriores. Una de ellas, y bien conocida, consiste identificar la luz visible (fenómeno ondulatorio electromagnético comprendido entre 380 a 700 nm, que viaja en el vacío a 3×10^8 km/s), con una fuente luminosa (Widiyatmoko & Shimizu, (2018)). El estatus de fuente luminosa para un estudiante de DI es muy concreto y está asociado al uso de lámparas comerciales, es decir, a fuentes extensas de diverso tipo (contenido que también forma parte del curso). Pero en física una fuente extensa (el Sol, una estrella, una lámpara, un objeto opaco que refleja luz proveniente de una fuente de luz) es modelada como un conjunto de fuentes puntuales. Es decir, un conjunto de emisores sin dimensión, donde cada uno de ellos emite frentes de onda esféricos que viajan con la velocidad de la onda en todas direcciones. A medida que la distancia del frente de onda del emisor aumenta, el radio también lo hace, de modo que, una fuente muy alejada puede ser modelada con frentes de onda planos. La normal a esos planos coincide con la dirección de la velocidad de la onda.

Es evidente, a partir de esta descripción que, cuando la fuente está muy alejada, los rayos luminosos son paralelos entre sí. El concepto de *rayo luminoso* ilustra esta descripción, ya que, permite visualizar la propagación rectilínea de la luz y agrega, a la normal del frente de onda, el sentido de avance. Es decir, frente a una imagen muy sencilla de rayos paralelos llegando a una superficie se encadena una serie de conceptos: fuente puntual, onda electromagnética, frente de onda, velocidad de desplazamiento, entre otros, que no son de inmediata comprensión para los alumnos. El Sol es la fuente luminosa natural por excelencia ligada al quehacer cotidiano de los seres vivos. Se trata de una fuente extensa, emisora de luz blanca, no polarizada, es decir, con atributos abstractos y desconocidos para los estudiantes.

Por su parte, los objetos (que pueden no necesariamente ser fuentes de luz) son visibles porque ellos mismos emiten o reflejan la luz (natural o artificial). En la mayoría de los libros de física universitaria, los objetos representados en los esquemas muestran velas verticales, incluso en los más modernos textos elementales (Hewitt, (2016): 536). Las velas, objetos luminosos sin duda, anteriores a Edison, se usan por su clara orientación arriba-abajo, para poder determinar la inversión, o no, de la imagen, y el aumento lateral. Pero, en el contexto teórico de la óptica geométrica, la vela debe ser tratada como una fuente-objeto puntual para que valga la aproximación paraxial de la óptica geométrica. Estos modelos, para los alumnos de diseño, contrastan

fuertemente con su experiencia práctica. No es inmediato imaginarse frente a un espejo como siendo un objeto tapizado de emisores puntuales de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz y cuyos frentes de onda son reflejados por la superficie pulida del espejo para formar su imagen virtual en nuestro cerebro.

El concepto de reflexión tiene entonces que ser analizado: la reflexión- y por tanto la formación de imágenes- puede ocurrir sobre una superficie pulida como la de un espejo tradicional (reflexión regular), o bien, sobre una superficie no pulida (reflexión irregular o difusa), como ocurre en la mayoría de las superficies donde las irregularidades reflejan la luz en todas direcciones y no hay formación de imágenes especulares. Este tipo de reflexión también es importante para un alumno de DI, interesado en la capacidad de difusión de las diferentes superficies con las que trabaja a diario. La difusión está relacionada con la longitud de onda de la luz, en relación con el relieve medio de las superficies. Este tema ha sido integrado al proyecto grupal propuesto titulado "Materiales Mutables" donde se tiene en cuenta la absorción y reflexión de la luz sobre diferentes superficies materiales (ver Parte II).

Para un estudiante de DI la reflexión de la luz es un fenómeno concreto, observable y enriquecedor de su espacio proyectual. Un campo de exploración de materiales y tipos de superficie y colores, donde todos los conceptos están estrechamente interrelacionados. Por ello, contenidos tales como la definición de índice de reflexión, o la caracterización de materiales antirreflejantes, se vuelve un contenido adicional (Schwartz (2019): 278-279). El alumno debe terminar el curso con la comprensión que la cantidad de luz reflejada por un cuerpo depende de: a) la longitud de onda de la luz, b) de si está o no polarizada, c) de la textura de la superficie (plana, rugosa, regular, irregular, opaca, pulida), d) del ángulo de incidencia de la luz sobre la superficie, y, finalmente, de la naturaleza de la superficie (composición, estructura, densidad, color).

En los gráficos usuales de los libros de óptica el observador está simbolizado por el dibujo de un pequeño ojo. El ojo (en realidad la pupila) capta los rayos reflejados desde la superficie, y con la ayuda de la córnea y del cristalino (lentes biológicas), los hace converger en la retina donde se forma una imagen invertida. El nervio óptico lleva la señal al cerebro donde es procesada y el resultado es una imagen que parece provenir de detrás de la superficie del espejo. El espejo hace visible (percibible) la imagen de un referente presente, que es reflejado. Ese "hacer visible", por lo tanto, se relaciona con las imágenes mentales, y por ello, con la categoría de lo fantástico. Con lo cual, nos encontramos en una nueva simplificación gráfica de un proceso muy complejo.

El fenómeno de la reflexión: principio de Fermat, reversibilidad, campo visual

Se dice que la luz se refleja cuando regresa hacia el medio del cual provino, dando lugar al fenómeno de la reflexión. Sin duda, y como afirma U. Eco (Eco (1985): 8-20), el espejo es un fenómeno en sí mismo que puede analizarse desde múltiples dimensiones. Es un umbral que señala dos realidades: el “espacio objeto” y el “espacio imagen”, uno habitado por objetos y fuentes reales, el otro dando origen al reino de la virtualidad.

Los rayos siguen su camino óptico desde el emisor (objeto-fuente) hasta el receptor (observador). La forma en que lo hacen sigue el camino más corto, es decir, emplean el mínimo tiempo en ir de un punto al otro (Principio de Fermat). El principio de Fermat también demuestra la reversibilidad de los rayos luminosos, es decir, la inversión de los roles de objeto-observador. Este hecho no es menor para un estudiante de DI, ya que, se trata de observar y de ser, al mismo tiempo, observado. Los ojos que se ven en un espejo nos están viendo al mismo tiempo. Ello era bien conocido en la época de Luis XIV con sus paredes tapizadas de espejos en el Palacio de Versalles. El fenómeno de la reflexión, además del efecto de la multiplicación de los espacios, generó un narcisismo colectivo, donde se ensayaba una normativa destinada a agradar a los demás, un mimetismo controlado y cuidadosamente medido (Melchior, (2014):211-242). Pero, esa sensación de observar y ser observado tiene que ver con el concepto físico de campo visual para cada observador, otro concepto central para un estudiante de DI.

Tipos de espejos y formación de imágenes

Los espejos pueden ser planos, esféricos o bien de otras formas (cónicos, cilíndricos, parabólicos, elípticos). En este trabajo sólo se consideran espejos planos y esféricos. En el caso de los espejos planos, se trata de superficies donde la reflexión (95%) permite la formación de imágenes virtuales que son siempre derechas y del mismo tamaño que el objeto.

La preconcepción más extendida es la creencia en la inversión izquierda-derecha en los espejos planos. El espejo no invierte. Simplemente refleja lo que se coloca frente a él. El problema no está en el espejo, sino en quien lo mira. Esta confusión está tan arraigada que muchos textos la tratan invitando al lector a la experiencia, ya no de la inversión derecha-izquierda, sino también a la inversión arriba-abajo (Kane, (2000): 556).), que es la que se obtiene cuando se coloca un espejo en el techo o en el piso. Es decir, la inversión está en el eje perpendicular a la superficie, pero dado que nosotros tenemos simetría bilateral, frente a un espejo nos es más fácil hablar de “inversión izquierda - derecha” (Gadner (1985): 1-21)).

Los espejos planos también permiten arreglos para poder ver sin ser visto. Como en el periscopio formado por dos espejos planos, paralelos, inclinados 45° con la horizontal. Es decir, permiten explorar la capacidad de conducir la

luz entre puntos alejados a partir de reflexiones múltiples. También sobre este aspecto volveremos en la segunda parte.

Los espejos esféricos pueden ser cóncavos o convexos, según sea la superficie pulida semiesférica, vista por el observador, la interna o la externa, respectivamente. La forma de diseñar un espejo esférico puede pensarse, por ejemplo, a partir de cubrir con pequeños cristales de forma hexagonal toda la superficie cóncava o convexa. De esta manera, cuando la luz llegue a un cristal, cada trozo se comporta como un espejo plano, con su propia normal. El resultado será una imagen que depende del radio de curvatura del espejo y de la posición del objeto. Pero, en este caso, aparece algo nuevo. Cuando una fuente lejana se refleja sobre un espejo plano su imagen es simétrica al espejo y, por la tanto, también muy alejada. Pero, al dar curvatura a la superficie pulida, un rayo de luz proveniente de un objeto muy alejado llega al espejo, luego de reflejarse, hace que estos rayos se concentran en un punto (foco imagen). Este punto se encuentra a una distancia igual a la mitad del radio, medida desde el vértice del espejo, en el espacio objeto para los espejos cóncavos y en el espacio imagen para los convexos. Luego, por la reversibilidad de los rayos ópticos, un foco puntual, colocado en ese punto (foco objeto), será reflejado por el espejo y su imagen estará, en consecuencia, muy alejada. La coincidencia de los focos multiplica las posibilidades del diseño.

Los espejos convexos, al igual que los espejos planos, forman siempre imágenes virtuales derechas, pero en este caso, siempre de menor tamaño. La distancia de la imagen deja de ser simétrica, como en el espejo plano. Ahora, cuanto más cercano esté un objeto al vértice del espejo, su imagen será de mayor tamaño y estará más cerca del vértice, que aquella del objeto. El resultado es una imagen distorsionada, ya que, las rectas, a diferencia de la transformación especular, dejan de ser invariantes. Todas estas posibilidades fueron bien exploradas desde el arte como se presenta en la segunda parte.

Desde la mirada del diseño se explota el hecho que la curvatura convexa permite un campo de visión mucho mayor que el correspondiente a un espejo plano. Es por ello que se utilizan para decoración como también en los estacionamientos, calles o autopistas donde se necesita poder anticipar cualquier movimiento vehicular. También en el diseño de los espejos laterales de los autos, y por ello, los vehículos vistos sobre el espejo están más cerca de lo que parecen.

Los espejos cóncavos, al igual que los convexos y los planos también pueden formar imágenes virtuales derechas, pero con la limitación que lo hacen solo para objetos que se encuentren en posiciones comprendidas entre el vértice y el foco del espejo. La ventaja es que, en este caso, son de mayor tamaño, es decir, aumentadas. En cualquier otro punto diferente al foco y, a distancias

mayores a éste, el espejo formará imágenes “reales”, invertidas. “Real” es un nombre engañoso, ya que son completamente irreales como un holograma. Quien las percibe puede confundirlas con el objeto material sólo hasta que intenta tocarlas y descubre su inmaterialidad. Este hecho es utilizado para hacer productos como el microscopio, formado por el juego de espejos cóncavos, colocados uno sobre otro, Un pequeño objeto situado sobre el vértice del espejo inferior, gracias a las reflexiones internas y a una abertura circular sobre el espejo superior (Muñoz L. (2011)), genera una imagen real del objeto, el cual parece emerger materializado del sistema.

Los espejos cóncavos, debido a la posición de sus focos en el espacio objeto, son concentradores de energía, abriendo nuevas puertas al diseño desde la más remota antigüedad (Pendergrast, (2003)). Los hipotéticos espejos ustorios de Arquímedes (212 A.C.) son un claro ejemplo de ello. Es decir, el uso de un inmenso espejo, o de gran número de escudos metálicos pulidos, para concentrar la luz del Sol e incendiar los galeones romanos enemigos, es bien conocido. En caso de haber ocurrido, se trata del uso remoto de la energía solar para fines bélicos (Valiullin, (2010):387-396). Lo que se puede afirmar es que, si no sirvieron para quemar barcos, si pudieron cegar o generar algún tipo de quemaduras. Un involuntario símil actual del mitológico “rayo de la muerte” de Arquímedes está en Londres. Se trata del edificio Walkie Talkie, diseñado por el arquitecto R. Viñoly que, debido a su forma y superficie vidriada, genera una reflexión de alta concentración de energía (Zhu J, (2018)) que produce el quemado de la pintura de autos (Coke, 2015), permite freír huevos en la calle, pero también produce cambios severos en la dirección, la temperatura y la velocidad del flujo de aire en su entorno (Patt (2019)).

Pate II: Propuesta metodológica

El fenómeno de la reflexión

Debido a la modalidad exclusivamente virtual en tiempos de pandemia se procedió a explorar los recursos disponibles en Internet, en particular videos y simuladores dedicados a la enseñanza de la óptica geométrica y a la teoría del color, como complementos del aprendizaje impartido en las clases sincrónicas, ya que, ningún simulador o video, por sí solo, logra el aprendizaje integral que se propone a los estudiantes de DI.

Tal como fuera desarrollado en la primera parte, las preconcepciones más comunes asociadas a los espejos son: a) la confusión de luz con fuente de luz b) el problema de la inversión derecha-izquierda, o arriba-abajo en espejos planos, c) las imágenes virtuales y “reales” en espejos cóncavos, d) la relación de la luz con el color (Ceuppens et al., (2018)).

Las clases se estructuran en 4 fases: a) una introductoria asincrónica con videos disponibles en Internet cuyos enlaces están subidos al campus de la facultad con anterioridad, b) una teórica sincrónica, interactiva, donde se presenta la teoría de espejos planos y esféricos, se discute lo visto y analizado en los videos, c) una fase de ejercitación con cuestionarios conceptuales, actividades prácticas con objetos concretos, donde se aborda la solución desde la representación gráfica (trazado de rayos), la analítica y la simulación del problema con programas de uso libre y, finalmente d) una fase de carácter proyectual, asincrónica, destinada a la investigación y aplicación de lo estudiado a un diseño concreto. En esta etapa se introducen las aplicaciones más difundidas de los diferentes tipos de espejos. La misma consiste en un proyecto individual y en un proyecto grupal. El segundo (transversal a la materia) reúne los conocimientos de unidades diferentes. En este trabajo, en particular, se trata de vincular lo aprendido en óptica geométrica con lo asimilado en la teoría del color.

En cuanto a la fase introductoria para espejos planos se selecciona una serie de videos para que los alumnos puedan analizar: a) la diferencia en la imagen de objetos simétricos o asimétricos (enantiomorfos), dextrógiros o levógiros; b) la simultánea equidistancia al espejo del objeto y de la imagen, la inversión y el tamaño, c) la diferencia entre una superficie pulida y un vidrio semitransparente (posibilidad de diseñar trucos de magia), d) la generación de imágenes en espejos planos enfrentados y en espejos angulados (en particular a 90°), e) el fenómeno de reflexiones sucesivas y su analogía con las fibras ópticas. Para espejos esféricos: a) las deformaciones que se producen en la imagen cuando se va arqueando el espejo en una u otra dirección, b) el efecto de cambiar la posición del objeto y/o del observador frente a un espejo (campo visual).

En relación con la fase 2, para el estudio de todos los temas de óptica geométrica, los alumnos instalaron el programa abierto *Student Physics Optics* que les permite el cálculo y la visualización para el estudio de diversos instrumentos ópticos, en particular espejos planos y esféricos.

La formación de imágenes en un espejo esférico, de radio dado, se logra con el simulador rápidamente, ya que, los alumnos van extrayendo conclusiones de lo que ocurre a medida que se acerca un objeto alejado al vértice. De este modo los estudiantes van teniendo una clara comprensión de las variables (posición del objeto y de la imagen) y de la dependencia del cambio de tamaño -o inversión- en función de estas dos variables. Ello permite sumar a la resolución clásica de problemas (analítica y gráfica), la simulación en tiempo real, y, con ello, la corroboración directa de ambos tipos de resultados.

Con respecto a la solución analítica, la fórmula de espejos no presenta dificultades para los espejos planos, dada la igualdad entre la distancia objeto y la distancia imagen al espejo. En efecto, el mayor potencial se obtuvo en la

enseñanza de la formación de imágenes en los espejos esféricos. Para salvar el tema de las diferentes convenciones, y poder ir al núcleo de la cuestión (tipo de imagen, posición y aumento), la presentación de la ley se hizo directamente desde la posición de la imagen (s'), asumiendo que la posición del objeto (s) es un múltiplo (k) real y positivo del radio (R). De esta forma, por ej. para espejos convexos, las ecuaciones para la posición de la imagen y el aumento son sencillas y facilitan el análisis físico de la formación de imágenes.

Los problemas para resolver están ligados con la etapa de diseño. Se eligen para que tengan aplicaciones concretas tales como a) determinar la altura mínima de un espejo plano y la altura a la que debe ser colgado para que cada alumno pueda verse de cuerpo entero, b) la formación de imágenes múltiples con espejos angulados ligados, por ejemplo, al diseño de un botiquín para baño con los espejos laterales, para aplicar la ventajas del “reflejo del reflejo” y las dimensiones del mismo, incluyendo accesorios, como espejos esféricos, de los que tendrán que determinar el radio de curvatura para un dado aumento.

A continuación, se ilustra de la fase 2 la presentación de la ley de Snell combinando dos simulaciones de uso libre.

La ley de Snell y el Principio de Fermat

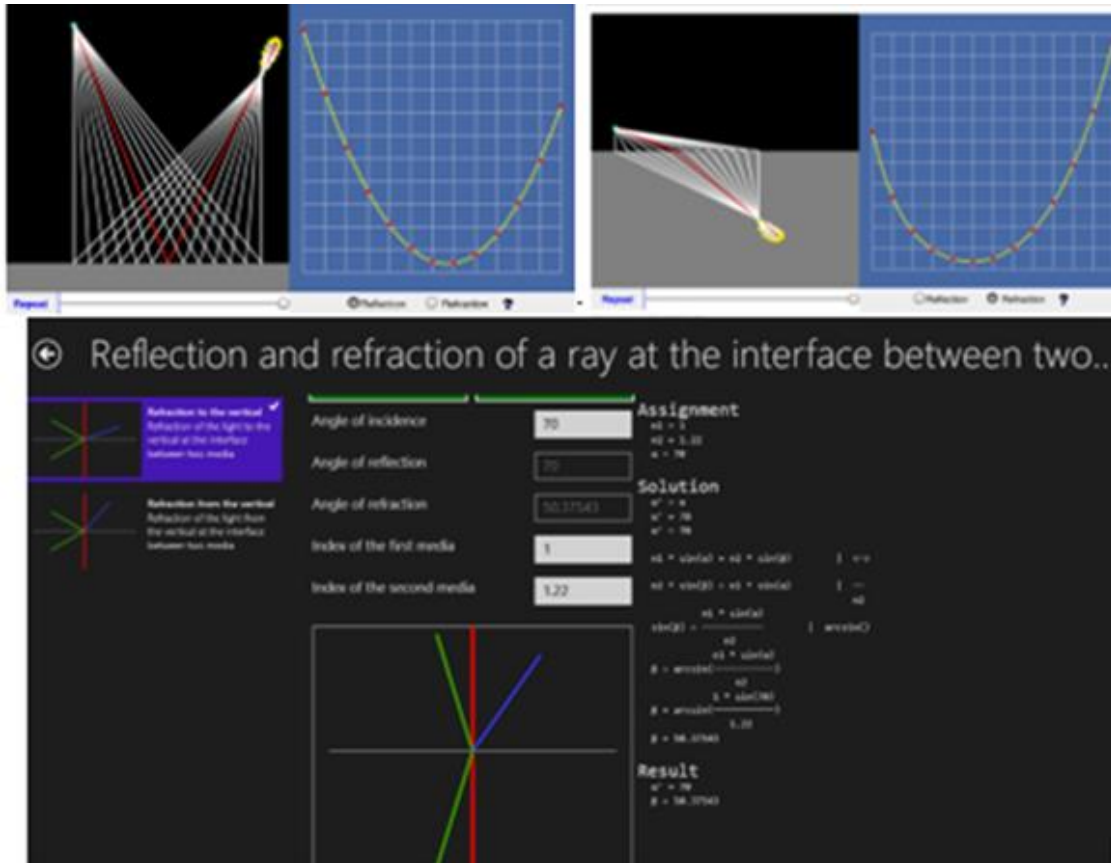
El principio de Fermat es un principio general que da solución a la pregunta de hallar el camino que minimice el tiempo para llegar de un punto a otro. En el caso de la óptica geométrica los puntos simbolizan al ojo del observador y al objeto puntual a observar, teniendo en dicho camino óptico la condición de contener un punto del espejo (para la reflexión), o bien, de atravesar la superficie de separación de dos medios transparentes (para la refracción). En el caso del fenómeno de reflexión, dicho principio introduce una solución gráfica al problema -no trivial- de hallar el punto en el espejo en que el rayo debe reflejarse para una situación dada. Dicha construcción consiste en unir la imagen puntual del objeto con el ojo del observador y ver dónde se produce la intersección con el espejo. Luego, a partir de ese punto -y con un rápido análisis trigonométrico- se deduce la ley de Snell (el ángulo de incidencia es igual al reflejado). La intercambiabilidad de los puntos en el análisis pone en evidencia al hecho físico -no menor- de la reversibilidad de los rayos ópticos. Muchos textos clásicos explican este fenómeno de una manera amena (Feynman (1963): 26-4 26-14). Sin embargo, hoy en día se dispone de simuladores (Suredranath, B) que permiten seleccionar dos puntos cualesquiera sobre un plano y ver, en tiempo real, la emisión de rayos desde uno de ellos, seguir los rayos reflejados (o refractados) junto a un gráfico donde se representa el tiempo para cada rayo, como se muestra en las imágenes de la Figura 1 (arriba). La gráfica presenta el trayecto mínimo solo para un rayo que es destacado en color rojo en la simulación. La figura 1 muestra dos ejemplos de las simulaciones donde el alumno puede, para el caso de la

reflexión, imprimir las imágenes, hallar los ángulos incidentes y reflejado como se muestra en la Fig.1. (arriba-izquierda)) y concluir la ley de Snell. Para la refracción, conociendo la ley de Snell y, a partir de la medición de los ángulos incidente y refractado de la simulación (Fig. 1 (arriba- derecha)), pueden hallar el índice de refracción del segundo medio, utilizando el programa libre *Student Physics Optics* (Fig. 1 abajo), suponiendo que el primer medio es aire.

Los espejos, arte y óptica geométrica

Desde el arte, se cuenta con muchos recursos para poder ilustrar y trabajar con los conceptos asociados a la reflexión de los espejos. Los alumnos de DI muestran interés por el descubrimiento de la perspectiva lineal, realizado por F. Brunelleschi (1425). El artista-arquitecto perfora su pintura del baptisterio de San Juan, justo en el punto de fuga de la obra, para mirar a través de ella desde el reverso del cuadro. Un espejo frontal plano le permitía simultáneamente ver la imagen reflejada de su pintura, la imagen de su ojo, pero también el frente del baptisterio real.

Figura 1: Principio de Fermat para la reflexión y para refracción



Fuentes: Simulador Principio de Fermat (arriba) de <https://bit.ly/3hdVZ8M>; y simulador de óptica geométrica (abajo) de <https://bit.ly/360rga5>

Luego, moviendo adecuadamente el espejo y situándose en el punto adecuado, la pintura tenía absoluta continuidad con la obra arquitectónica. Con este simple experimento -que simplificado puede ser realizado por los alumnos- se valida el descubrimiento de la perspectiva lineal. Muchas obras artísticas sirven para discutir y fijar conceptos vinculados al campo visual de un espejo plano. Son ejemplos clásicos el Bar de Follies-Bergère de Manet, la Venus y Cupido de Velázquez (Hech, (1974): 173) o sus famosas "Meninas" (Foucault, (2003): 13-25), entre muchos otros.

La formación de imágenes en espejos convexos se utiliza como recurso artístico desde el Gótico en adelante. Representa, no solo un recurso ilustrativo en las clases, sino que también permiten la aplicación de las leyes físicas y la obtención de resultados cuantitativos. Tres ejemplos que aportan diferentes observaciones sobre la formación de imágenes en espejos convexos son: a) El

matrimonio Arnolfini de Van Eyck (1434), donde el espejo muestra, además de la imagen posterior del matrimonio, lo que queda fuera del cuadro, es decir, dos personajes asomados a la puerta de la alcoba, hipotéticos testigos del matrimonio en el primer plano. Esta obra permite introducir el concepto de campo visual en este tipo de espejos, además de ver la disminución de la imagen a medida que aumenta la distancia del objeto al vértice del espejo o discutir tamaños máximos posibles de las imágenes formadas; b) el autorretrato del Parmigianino (1520) fue pintado sobre una tabla convexa especialmente preparada para imitar la misma curva del espejo utilizado (Coliva, (2016):19). Es un excelente ejemplo de las deformaciones de la imagen y el aumento de tamaño de los objetos a medida que se acercan al espejo, c) la obra "Mano con esfera reflectante" de M. Escher (Escher (1975): 70), agrega el hecho que, si el objeto está en contacto con el espejo, la imagen virtual prolongada es del mismo tamaño.

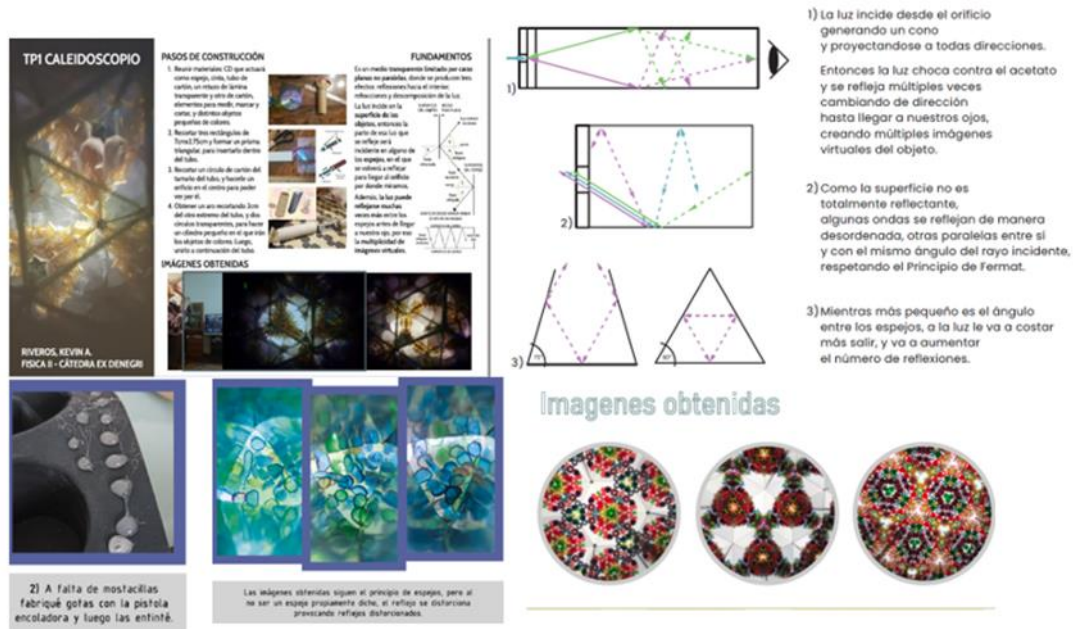
Todas las actividades anteriores se completan con la fase 4: la etapa proyectual, donde los alumnos tienen una entrega individual y otra grupal, que se desarrollan a continuación

Etapa proyectual

Proyecto individual: Construcción de un caleidoscopio

El caleidoscopio es un producto patentado en 1817 por D. Brewster. Presenta en la actualidad una gran variedad de diseños y modificaciones que pueden verse en la galería de la Brewster Kaleidoscope Society, destinada a artistas y diseñadores (Brewster Society 2020). Desde sus orígenes, es un juguete de enorme difusión que utiliza el principio de la reflexión múltiple de la luz en espejos dispuestos en un arreglo prismático triangular, con su cara pulida hacia el interior. Este dispositivo, no solo aporta conocimientos sobre la física de las reflexiones en espejos angulados, sino que también puede ser utilizado para el diseño en otros campos. En la Bienal de KOBE 2013 el primer premio del concurso Art Container fue recibido por montar un caleidoscopio, en una forma totalmente nueva, donde el movimiento de los visitantes era parte activa del mismo. Luego de estudiar el tema de espejos, se propuso a los alumnos construir un caleidoscopio, del cual, y debido a la pandemia, solo tenían que enviar una presentación de tamaño A5 de las etapas de su construcción y de las imágenes finales obtenidas. Dado que era la primera actividad práctico-constructiva, se los dejó con total libertad para su realización. Cuando se vuelva a la presencialidad, esta actividad será realizada en la modalidad de taller y los caleidoscopios serían presentados en la Expo-FADU, a fin de año.

Figura 2: Proyecto caleidoscopio



Autor: Alumnos de la cátedra Ex -Denegri: (K. Riveros, J. Ocupe Leiva, F. San Martin y F. Rosano).

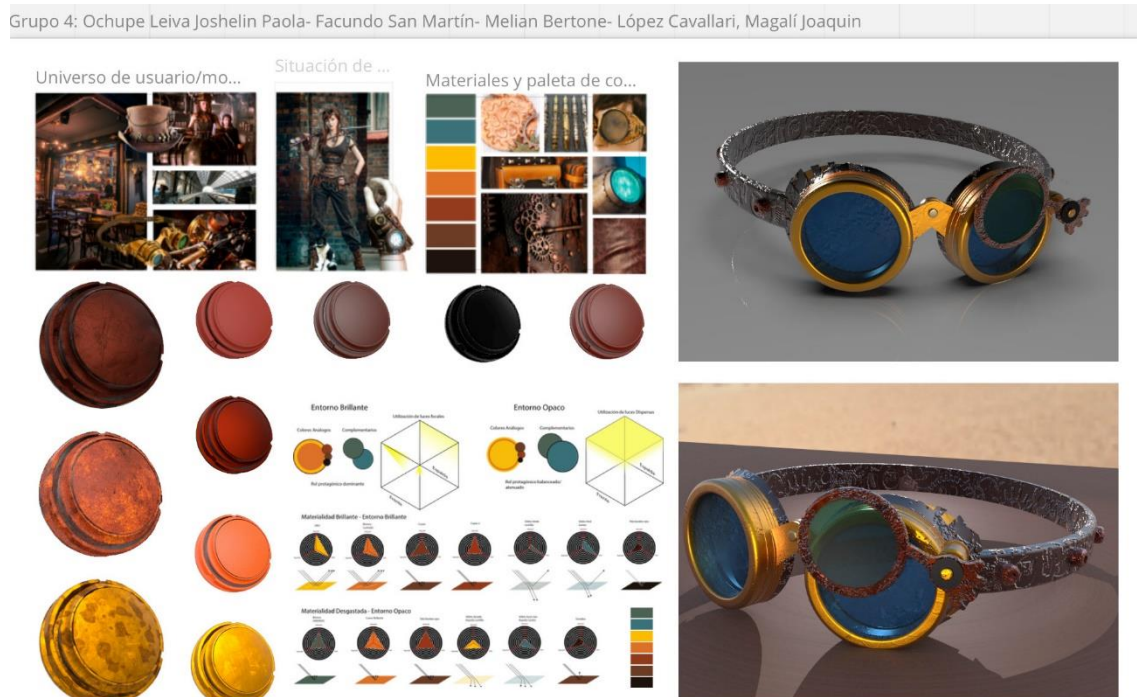
De las entregas se destacan tres aspectos: a) los alumnos que se consagran a experimentar con la superficie del espejo o los materiales constructivos en general, b) los alumnos que se detienen a reflexionar el efecto que tiene el cambio de angulación de los espejos sobre las imágenes finales, c) los alumnos que realizan una construcción clásica, pero se concentran en la estética del patrón final de formas. La figura 2 ilustra cada uno de estos casos. El panel presentando por el alumno K. Riveros (derecha y arriba) sustituye los espejos por superficies cortadas de CDs para reflejar la luz, pero analizando qué cambios introduce la textura en las reflexiones. La alumna J. Ocupe Leiva (Fig. 2 derecha- abajo) utiliza papel de aluminio para los espejos y las cuentas las genera a partir de gotas de pegamento, que luego colorea de acuerdo con una paleta personalizada. En cambio, el alumno F. San Martin se detiene a estudiar el fenómeno óptico *per se* y experimenta con diferentes ángulos para explorar cambios en la formación de imágenes. Finalmente, la alumna F. Rosano se detiene en las combinaciones de colores para lograr patrones armoniosos.

Etapa proyectual grupal: Proyecto Materiales Mutables,

La propuesta se tituló Materiales Mutables. Su objetivo fue trasladar lo aprendido a un producto concreto en relación con su entorno. El trabajo se

definió en tres fases: introducción, aplicaciones (de los materiales al objeto y al entorno) y presentación final (precedida por una pre-entrega). Los alumnos trabajaron seleccionando una paleta de colores para el objeto y el entorno, analizando iluminación en diferentes planos, interacciones cromáticas, texturas, tipos de contrastes, reflejos etc.

Figura 3. Proyecto de Materiales Mutables



Autor: Alumnos de la cátedra Ex -Denegri: J.P. Ochupe Leiva, F. San Martín, M. López Cavallari, J. Melián Bertone.

La Figura 3 ilustra el trabajo de uno de los grupos. Los alumnos optaron por seleccionar un usuario ficticio. Esta decisión de diseño les permitió seguir el proceso de aprendizaje desde un lugar lúdico, generando una propuesta con coherencia proyectual, pudiendo aplicar y justificar, con soltura, los conocimientos físicos aprendidos. A lo largo de este trabajo se establecieron una serie de objetivos claros, conectando aquellos contenidos impartidos en óptica geométrica y la teoría del color con sus intereses proyectuales.

Para generar y diseñar los contenidos educativos de esta propuesta se usó el software en línea "genially". Este recurso digital permitió crear una serie de apuntes interactivos, en formato de presentación en línea, donde se puede diseñar los atajos de acceso, gráficas de la presentación y colocar todo tipo

material educativo. Una vez diseñada la presentación interactiva y explotando las herramientas que otorga para la navegación e interacción virtual, los alumnos pudieron acceder a la propuesta y a todos los materiales destinados para la mejora de la misma.

Todas las fases incluyeron videos introductorios, reflexivos, realizados por los docentes (ver enlace *catedra Ex-Denegri*). Para el desarrollo del trabajo los alumnos tenían la posibilidad de optar por el software *Adobe Substance 3D (Substance Alchemist, Painter)* o el *Keyshot*. Para la documentación y seguimiento del proceso por parte de los docentes se hizo uso de la herramienta digital en línea, "miro" donde se diseñaron paneles con diferentes tipos de información útil para el alumno, para el área de trabajo y, finalmente, un tablero, donde cada grupo colocó el panel del trabajo final. Los enlaces, la actualización de contenidos, la impartición de consignas, el seguimiento activo y el espacio de consultas se realizó, también, mediante correo electrónico y el campus FADU-UBA. Para las correcciones se realizó un video de devolución para cada uno de los grupos que se subió a una sección de miro dedicada a esta tarea. Luego, los videos se agruparon en una presentación interactiva de manera que todos los estudiantes pudieran acceder a una misma fuente virtual y pudieran escuchar las correcciones de los otros grupos.

Conclusiones

En este trabajo se presentaron algunos aspectos del dictado de clases de la unidad reflexión de la luz para alumnos de la carrera de DI, en la modalidad virtual, durante la pandemia (*Cátedra Ex-Denegri*). La misma incluye el tratamiento analítico, gráfico y de simulaciones de uso libre. A la evaluación tradicional se sumaron trabajos, individuales y grupales, en el marco de proyectos concretos donde se integraban unidades temáticas. En particular la física de la reflexión y la teoría del color.

Los alumnos se mostraron interesados en la propuesta y trabajaron con entusiasmo en tareas de investigación y construcción de prototipos. Para un alumno de DI es fundamental mostrar sus proyectos, discutirlos, exponerlos a fin de año en Expo-FADU, ya que dedican muchas horas y esfuerzo para que queden encerrados en el olvido de sus carpetas.

Dado a que esta particular población de alumnos cuenta con amplia experiencia en diferentes tipos de software, el abordaje con diversas herramientas digitales les es atractivo. A ello se suman las actividades de proyecto, que, en presencialidad, se espera poder realizar en los talleres de la facultad.

Los alumnos se dan cuenta que, para lograr significativas mejoras en sus proyectos, el conocimiento de la física de la óptica y el color se vuelve

necesario. Descubren que, el estudio de los fenómenos de reflexión y, en particular el de la especularidad, los prepara para la comprensión de conceptos más abstractos ligados a la simetría de reflexión, de gran importancia en el análisis y producción de formas.

Los diseñadores necesitan del sentido y de la finalidad de sus esfuerzos, deben sentir que trabajan en función de algo y ese algo es la propuesta proyectual en sí. El diseño es una disciplina en constante evolución y cambio (Vega, (2020)), y es por ello hay que adaptar los contenidos tradicionales de física a la propia naturaleza de la disciplina.

Bibliografía

- Brewster Kaleidoscope Society (2021). Recuperado el 28/06/2021 de: <https://brewstersociety.com/>.
- Coliva, A. (2016). Parmigianino, Editorial: Giunti Editore.
- Cátedra ExDenegri: Materiales Mutables: Recuperado el 28/06/2021 de: <https://view.genial.ly/60b28b8a0f5a7e0d70846c73>.
- Ceuppens, S., Deprez, W., Dehaene, W., & De Cock, M. (2018). Tackling misconceptions in geometrical optics. Phys. Educ. 53. 045020 (10pp).
- Cork G. (2015). Taming the death ray, AEC MAC magazine. Recuperado 28/06/2021 de: <https://aecmag.com/opinion/taming-the-deathray-design-visualisation-lightworks/>
- Eco, H. (1985). De los espejos y otros ensayos. Editor digital: Titivillus ePub base r1.2.
- Escher MC. (1975). The graphic work of M.C. Escher. Introduced and explained by the artist. New York, Ballantine Books.
- Feynman, R. P., Leighton R. B. y Sands, M. (1963). The Feynman Lectures on Physics, Vol. I. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Foucault, M. (2003) Las palabras y las cosas. Capital Federal, Siglo XXI editores.
- Gadner, M. (1985). Izquierda y derecha en el cosmos. Biblioteca Científica Salvat
- Genialliy. Recuperado el 28/06/2021 de: <https://www.genial.ly/es>
- Hech E, Zajac, A. (1975). Óptica. Bogotá. Fondo Educativo Interamericano
- Hewitt, P.G. (2016). Física Conceptual. Pearson. México.
- Kane JW; Sternheim, M.M. (2000). Física. Cap. 24 Espejos, lentes e instrumentos ópticos. 2da ed. Barcelona. Editorial Reverté. S. A.
- Mengarelli, L. Espejos e imagen (magia y ciencia) Recuperado el 28/06/2021 de: <https://www.youtube.com/watch?v=jhr1vIIDoj8>.
- Melchior-Bonnet, S. (2014). Historia del Espejo. Editorial Edhasa.
- Miro. Recuperado 28/06/2021 de: <https://miro.com/signup/>

Muñoz L. (2011). Imagen Real: recuperado el 28/06/2021 de:
<https://www.youtube.com/watch?v=ylijglHHPgY>.

Patt, D. The Walkie Talkie Building and the Wind Below in London, England.
Recuperado 28/06/2021 de: <https://www.youtube.com/watch?v=edQZF8-FEo>

Pendergrast, M. (2003). Historia de los espejos. Barcelona. Bergara.

Schwartz, S. (2019). Geometrical and visual optics. A clinical Introduction. Mc.
Graw Hill Education. 3th ed.

Student Physics Optics. Recuperado 28/06//2021 de: <https://bit.ly/360rga5>

Suredranath, B., General Physics animation: Fermat's Principle: Hyderabad,
India, Recuperado el 28/06/2021 de:
<https://www.surendranath.org/GPA/Optics/Fermat/Fermat.html>

Valiullin, A., Tarabarin, V. (2010). Archimedes' Burning Mirrors: Myth or Reality?
History of Mechanism and Machine Science, 387–396.

Vega, E. 2020. Re-diseñar el diseño, una vez más. *Revista Experimenta*.
España: Barcelona.

Verity, A. (2013). 'Walkie-Talkie' skyscraper melts Jaguar car parts. BBC News.
Recuperado el 28/06/2021 de: <https://www.bbc.com/news/uk-england-london-23930675>

Whelan, J. (2014). Caleidoscopio gigante en el que los usuarios crean los
colores. Recuperado el 28/06/2021 de : <https://red-viajes.com/el-caleidoscopio-mas-grande-del-mundo-en-mount-tremper-nueva-york/>

Widiyatmoko, A. & Shimizu, K. (2018). Literature review of factors contributing
to students "misconceptions in light and optical instruments". International
Journal of Environmental and Science Education, vol.1, 13 (10), 853-863.

Zhu,J., Jahn, W., Rein, G. (2018). Computer simulation of sunlight
concentration due to façade shape: application to the 2013 Death Ray at
Fenchurch Street, London, Journal of Building Performance Simulation, 2018.
Recuperado el 28/06/2021 de: <https://doi.org/10.1080/19401493.2018.1538389>