

Historia de la Óptica en Zaragoza (1954-2016)

Autoría: Miguel Ángel Rebolledo

Publicación: Páginas 171-184 del libro “Academia de Ciencias de Zaragoza. Un siglo de servicio a la sociedad” (2016)

**HISTORIA DE LA
ÓPTICA EN ZARAGOZA
(1954-2016)**

*Reproducción del capítulo
“La Óptica”, del libro:*

**ACADEMIA DE CIENCIAS
DE ZARAGOZA
Un siglo de servicio a la sociedad**

PRÓLOGO

Con motivo de la celebración del centenario de su fundación, la Academia de Ciencias de Zaragoza decidió escribir su historia a lo largo de sus cien años de vida. Habría que escribir sobre su génesis, sus académicos y las diversas actividades que se habían llevado a cabo, incluyendo su contribución a la ciencia en Aragón. La labor se distribuyó entre diversos académicos y me correspondió escribir la historia de la Óptica en este periodo.

La tarea parecía abrumadora para alguien que no había vivido aquellos momentos heroicos en los que el Profesor D. Justiniano Casas inició la docencia y la investigación de la Óptica en Zaragoza. Pero el recuerdo de quien había sido un magnífico profesor y Maestro, así como un ser humano excepcional, me dieron energías para emprender la tarea.

Me puse en contacto con todas aquellas personas que iban a aparecer en la historia y solicité su colaboración (comentarios sobre su labor científica, publicaciones, documentos históricos,...). Todos me dieron su apoyo y me enviaron material abundante. A este material añadí las alrededor de cien tesis doctorales sobre óptica que se habían realizado en Zaragoza y otros diversos documentos que conseguí encontrar. Comencé a estudiar con gran ilusión, a tomar muchas notas y después fui componiendo la historia breve que se me había encargado. Cuando la tuve, la pasé a todos los que aparecían en ella, para que la revisaran, e hice las correcciones oportunas. El libro que contenía aquellas memorias sobre nuestra ciencia en Zaragoza y sobre nuestros científicos se publicó en el año 2016.

Durante estos últimos años, las actividades del comité de SEDOPTICA sobre Divulgación, Enseñanza e Historia de la Óptica (CODEHO) me han parecido muy interesantes y he ido sintiendo deseos de colaborar de alguna manera. El pasado mes de mayo le pregunté al presidente si la historia de la óptica en Zaragoza podría ser de interés para el comité. Ante su respuesta positiva elaboré este “reprint” que tienes en tus manos. Lo escribí con ilusión y humildad. Espero que te guste. También espero que incite a otros a escribir historias de la óptica en los distintos lugares de España. Yo estoy deseando leerlas

Miguel Ángel Rebolledo

-Catedrático de Óptica jubilado y Académico de la RACZ-

Zaragoza, Julio de 2024

A continuación se reproduce el capítulo “La Óptica”, comprendido entre las páginas 171 a 184 del libro “ACADEMIA DE CIENCIAS DE ZARAGOZA. Un siglo de servicio a la sociedad”. Este libro fue escrito, en el año 2016, por académicos numerarios de dicha Academia, para conmemorar el centenario de su fundación.

El libro completo puede encontrarse en la siguiente dirección de INTERNET:
<http://www.raczar.es/webracz/archivos/libroWeb.pdf>

LA ÓPTICA

La primera época: cálculo de sistemas ópticos y espectrómetro de masas.

La investigación en Óptica se comienza a consolidar en Zaragoza a partir de la incorporación del Profesor Justiniano Casas Peláez a la Facultad de Ciencias, como Catedrático de Óptica, en Septiembre de 1954. La penuria económica hacía ilusorio cualquier intento de emprender investigación de envergadura en física experimental por lo que, con un grupo reducido de colaboradores, dirigió su actividad hacia una investigación más teórica: el cálculo de sistemas ópticos. Para tratar de entender lo que significaba esa tarea en 1954 hay que tener en cuenta que solamente se podían utilizar calculadoras electromecánicas lentas (que únicamente eran capaces de realizar sumas, restas, multiplicaciones y divisiones), junto con tablas trigonométricas y de logaritmos en las que había que hacer interpolaciones. Este procedimiento impedía, en la práctica, la corrección de aberraciones utilizando exclusivamente el trazado de rayos. Por tanto, era necesario desarrollar métodos aproximados que permitiesen en un primer paso disminuir las aberraciones, hasta el punto que con el trazado posterior de un número muy reducido de rayos (en el plano meridiano para hacer asequible el cálculo), el sistema quedase corregido. Ayudaba a este propósito explorar la posibilidad de utilizar lentes con superficies esféricas (que al proporcionar más parámetros libres podrían facilitar la corrección) y conocer cuál tenía que ser el estado final de la corrección para que el ojo percibiese una buena imagen o para que se registrase una imagen de calidad sobre una placa fotográfica. Sobre estos temas se desarrollaron los trabajos en la Cátedra de Óptica durante los diez primeros años (hasta que la Facultad de Ciencias de Zaragoza dispuso del primer ordenador), manteniendo siempre un estrecho contacto con la Empresa Nacional de Óptica, el Taller de Precisión del Ejército, el Centro de Investigaciones de la Armada y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, lo que permitió fabricar instrumentos diseñados y comprobar su calidad.

El tema de superficies esféricas se dirigió al aprovechamiento de los resultados obtenidos por Casas en su tesis doctoral (sobre cuádricas de revolución) y al estudio de Óvalos de Descartes y de superficies tóricas, consiguiendo así avances en objetivos de microscopio y de cámaras fotográficas. El uso de métodos aproximados basados en aberraciones de tercer orden (tanto para superficies esféricas como esféricas) permitió el cálculo de sistemas operando con aperturas y campos pequeños. Pero el paso del tiempo iba requiriendo sistemas ópticos con aperturas y campos cada vez mayores, que eran más difíciles de corregir. A pesar de que la aproximación de tercer orden no es válida para estos casos, ellos investigaron fórmulas que permitiesen obtener la aberración real a partir de la de tercer

orden. Al hacer el estudio encontraron que para campos intermedios siempre había una relación lineal entre la aberración calculada trigonométricamente y la de tercer orden, y que para campos grandes esta aproximación lineal servía como base para el cálculo de la aberración de una manera simple, siendo entonces suficiente algunos retoques con marchas de rayos para obtener sistemas con buenas prestaciones. Además de los trabajos teóricos y de cálculo se emprendieron estudios experimentales para averiguar cómo debían ser corregidas las manchas aberrantes afectadas de difracción, para que el ojo percibiese una buena imagen o para que se registrase una imagen de calidad sobre una placa fotográfica. Se utilizaron instrumentos de visión y fotográficos en los que (usando objeto extenso) se medían las aberraciones y la calidad de la imagen (para encontrar relaciones entre ambas) y se buscaba la posición en la que se producía la mejor imagen, llegando algunas veces a conclusiones sorprendentes. Por ejemplo, que el ojo encontraba la mejor imagen, en el caso de sistemas astigmáticos con aperturas medias y grandes, en la posición de las imágenes sagitales (donde la imagen de un punto es un segmento de recta) en vez de en posiciones donde la imagen de un punto fuese simétrica, como cabría esperar. Sobre los temas descritos versaron las tesis doctorales de Arturo Arasti, José Lacasta, José Barcala, Félix Merino, José Ramón de Francisco Moneo, Salvador Valdés, Ramón García, Carmen Cuevas, José Luis Arias y María Josefa Yzuel (1958-1966).

El buen funcionamiento del grupo de Casas hizo que, en 1957, la Junta de Energía Nuclear lo seleccionase para una iniciativa relacionada con el interés que en aquel momento había por disponer de isótopos estables con un grado de enriquecimiento alto. Se trataba de construir en el plazo de dos años un espectrómetro de masas para la medida de relaciones de abundancia isotópica. La construcción de esta instalación suponía un gran reto porque requería la puesta en marcha de técnicas de óptica de partículas cargadas, de alto vacío y de electrónica, pero era una ocasión magnífica para poder abrir nuevas líneas de trabajo en el futuro. Empezaron la tarea Casas, Lacasta, Moneo, Javier Goñi (ayudados por Horacio Montolar que fue el técnico de la Cátedra de Óptica durante muchos años) y en la última época del proyecto se incorporó Manuel Quintanilla colaborando en la parte de óptica de partículas cargadas. Todo esto hubo que hacerlo cuando España padecía el bloqueo económico de la posguerra y era casi imposible la importación de material científico. Como además en aquella época construir no significaba ensamblar sino hacer en el laboratorio casi todas las piezas de la instalación, puede imaginarse fácilmente el ingenio, camaradería y dedicación (de día y de noche) que fueron necesarias. Al cabo de dos años se consiguió tener operativo el primer espectrómetro de masas de España, lo que tuvo resonancia nacional e

internacional y permitió a Casas (después de una estancia en la Universidad de Zurich) impulsar una línea de trabajo sobre separación de isótopos por termodifusión. José M^a Savirón inició la parte teórica de esta línea en su tesis doctoral y Quintanilla presentó la suya con el trabajo experimental que había llevado a cabo en Zurich y continuó en esta línea durante varios años, pasando después a trabajar en cálculo de sistemas ópticos y holografía hasta su marcha a Valladolid. Al cabo de un tiempo la línea de termodifusión generó un grupo de trabajo independiente dirigido por Savirón.

Entre 1964 y 1970 varios acontecimientos dieron nueva dimensión al grupo de Casas: él consiguió que la Caja de Ahorros de Zaragoza Aragón y Rioja financiase la compra de un ordenador IBM 1620 para la Facultad de Ciencias, Yzuel marchó a Reading para comenzar su trabajo en teoría difraccional de imágenes, Eusebio Bernabéu fue a París para iniciarse en bombeo óptico, Rafael Alcalá realizó estancias en Groningen y Still Water para emprender trabajo en física del estado sólido y se creó la especialidad de óptica, todo ello en un nuevo marco que era el recientemente creado Departamento de Física Fundamental. La vuelta de Yzuel, Bernabéu y Alcalá supuso la creación de tres nuevas líneas de trabajo (la última de las cuales dio lugar a un grupo de trabajo independiente que posteriormente se integraría en el área de física de la materia condensada) y la especialidad de óptica supuso un vivero de gente joven formada en óptica. Aunque el nuevo ordenador tenía una memoria pequeña permitió una mejora muy grande de la capacidad de cálculo. Eso sí, la necesidad de carga manual de programas y datos (mediante paquetes de tarjetas perforadas) suponía la presencia continua de los usuarios y más de una noche de insomnio cuando la tarea era larga.

Gracias al IBM 1620 se pudo comenzar a conocer el papel de la luz extrameridiana en los sistemas ópticos. Se empezó estudiando la evolución de los diferentes rayos conforme se iban corrigiendo las aberraciones, para encontrar los más eficaces, en aquellos sistemas en los que la corrección en plano meridiano no era suficiente. Posteriormente se emprendieron métodos más sistemáticos basados en la aberración de onda. Mediante desarrollos en serie de la superficie de onda se pudo estudiar la relación entre la luz extrameridiana y la simetría de dicha superficie. Esto permitió encontrar parámetros (tales como diferencia de alturas de impacto en plano paraxial de algunos rayos particulares) que controlaban el comportamiento de toda la luz extrameridiana y hacían posible una corrección eficaz con el trazado del menor número de rayos posibles. Por otra parte, se estudiaron de forma sistemática criterios que conducían a sistemas estables, con mayor tolerancia a cambios de sus parámetros característicos en el proceso de fabricación. Estos temas, junto con el estudio experimental de vidrios industriales y de criterios de calidad en la imagen, permitieron llevar a cabo las tesis

doctorales de Carmelo Oñate, Miguel Ángel Velasco, Miguel Ángel Antolín, Justiniano Aporta, María Jesús Toledo, Juan Manuel Lázaro y Jesús Beamonte (1966-1996). Todos estos conocimientos dieron lugar a una sistematización progresiva del proceso de optimización de componentes e instrumentos ópticos (mediante métodos de corrección automática), continuándose hasta el presente con el diseño de componentes y sistemas específicos para su fabricación posterior.

Formación y tratamiento de imágenes.

A su regreso de Reading, Yzuel inició su línea de trabajo en el marco de la teoría de la difracción, utilizando la función de transferencia de frecuencias espaciales para la evaluación de la calidad de la imagen. Partiendo del método que había desarrollado con Hopkins en Reading (que permitía el cálculo de la imagen de difracción de un punto objeto monocromático para un sistema con cualquier combinación de aberraciones) se iniciaron trabajos para el estudio difraccional de la imagen óptica policromática, esforzándose en desarrollar algoritmos cada vez más rápidos que aliviasen la complejidad del cálculo. Analizando las distribuciones de iluminación y de color obtenidas encontraron que ésta última variaba de forma notable al cambiar el estado de corrección de aberraciones. Este resultado (que indicaba claramente que el estudio del color en la figura de difracción añade mucha más información acerca del comportamiento de los instrumentos y de la influencia de las aberraciones que la que se obtendría con el estudio de la iluminación tan sólo) permitió obtener criterios para la optimización de la calidad de la imagen de sistemas ópticos operando con luz policromática y métodos para evaluar experimentalmente de una forma rápida esta calidad. Otras aportaciones interesantes se llevaron a cabo generalizando los métodos de cálculo de la imagen al caso de pupila con transmisión no uniforme (para estudiar mejoras en la imagen mediante filtros de amplitud o de fase) y a sistemas ópticos con pupila anular (objetivos de espejos para telescopios o teleobjetivos de visión nocturna por ejemplo) o con filtros parabólicos invertidos.

En 1974 se inició una colaboración (sobre imagen en diagnóstico médico) con el grupo que trabajaba en física médica en el Hospital Clínico de Zaragoza. Pretendían mejorar la imagen producida bien con rayos gamma emitidos por marcadores introducidos en el organismo (gammagrafía) o bien con rayos X transmitidos por él (radiología). Esto supuso un esfuerzo notable de puesta en marcha de métodos de cálculo y técnicas de medida de la función de transferencia para sistemas muy diferentes a las lentes y espejos, teniendo que hacer estudios sobre los efectos de las fuentes, los tejidos y los detectores. En el caso de las

gammacámaras desarrollaron un nuevo método para el cálculo de la respuesta del colimador (que condiciona fuertemente la calidad de la imagen), lo que permitió resolver el problema de la determinación del espesor y estructura óptimos en función de la posición y tamaño del objeto. En el caso de radiodiagnóstico encontraron la forma de minimizar la influencia del foco de rayos X en el deterioro de la imagen, con focos de distintas formas, para lo que fue preciso diseñar y construir un digitalizador de imágenes radiológicas. En ambos casos desarrollaron algoritmos que permitían llevar a cabo el filtrado digital necesario para mejorar la calidad de la imagen final. Los trabajos citados formaron parte de las tesis doctorales de Javier Santamaría, Javier Arlegui, Julián Bescós, Santiago Millán, Emilia Moya, Fernando Calvo, Araceli Hernández y Esther Millán (1973-1983) y Juan Manuel Lázaro (1991).

Óptica cuántica.

Eusebio Bernabéu inició otra línea de investigación en 1968, tras presentar su tesis doctoral con el trabajo que había realizado sobre bombeo óptico en el grupo de Kastler. El bombeo óptico permitía realizar nuevos experimentos para mejorar el conocimiento de las interacciones entre átomos y lo más apropiado para ello era estudiar los efectos de estas interacciones sobre los niveles y subniveles magnéticos de estructura hiperfina de los átomos (en concreto los alcalinos por la sencillez de su estructura). Para trabajar en estos temas en Zaragoza, fue preciso emprender el desarrollo de modelos teóricos en el marco de la óptica cuántica, de técnicas de bombeo óptico y de espectroscopía, de técnicas de fabricación de células con los átomos en estudio (depositados en instalaciones de alto vacío) y de lámparas para excitarlos, así como de generadores de campos magnéticos suficientemente homogéneos.

Los miembros del grupo estudiaron, por diversos métodos, los ensanchamientos y desplazamientos que los gases inertes (gases nobles, hidrógeno o nitrógeno) producían en el espectro hiperfino del alcalino (cesio fundamentalmente). El estudio se hizo en primer lugar a través de la medida de la relajación del bombeo, controlando en los haces de bombeo y de detección las polarizaciones y las direcciones (entre sí y en relación con el campo magnético) para excitar los observables oportunos. Posteriormente se pasó al estudio mediante la medida del espectro hiperfino de absorción, utilizando un interferómetro de Fabry-Perot y corrigiendo el efecto de su función de transferencia por deconvolución. En todos los casos se desarrollaron modelos teóricos (que servían para obtener los potenciales de interacción entre el alcalino y el gas inerte a partir de las magnitudes observadas en cada caso) que llevaron a la determinación de potenciales de interacción (en función del campo magnético) a partir de las medidas propias y de otras medidas publicadas por otros grupos de trabajo y no interpretadas.

Estudiaron también plasmas producidos con los elementos citados anteriormente, en lámparas de descarga de radiofrecuencia o de cátodo hueco, para averiguar las características estáticas y dinámicas del plasma (distribuciones de temperatura y de densidades electrónicas y propiedades ópticas) y para optimizar su emisión. Para obtener la información se dedujeron modelos teóricos y se midieron distribuciones de intensidad así como espectros hiperfinos de absorción y emisión (perturbados por colisiones y efecto Stark), utilizando espectrometría de red, de Fabry-Perot y de alta resolución por absorción saturada.

Otras técnicas en las que se investigó fueron espectroscopía de cruzamientos de niveles (para la determinación de vidas medias), detección óptica de transiciones de radiofrecuencia y detección óptica de transiciones de microondas mediante triple resonancia (óptica, de radiofrecuencias intensas y de microondas) que permite mejorar el control de relojes atómicos. En este último caso, fue necesario desarrollar modelos teóricos, para estudiar la perturbación de átomos debida a campos intensos, con los que se pudieron interpretar con éxito medidas existentes de triple resonancia. Finalmente, la experiencia en el manejo de técnicas de polarización en los trabajos expuestos condujo al desarrollo de un método dinámico de determinación de matrices de Mueller y de análisis de luz polarizada, basado en el uso de dos polarizadores lineales fijos y dos retardadores lineales giratorios. Los trabajos explicados resumen las tesis doctorales de Ramón Corbalán, Miguel Ángel Rebolledo, Fidela García, Ángel Ignacio Negueruela, José Miguel Álvarez, Julio César Amaré, Javier Pelayo, Antonio Cavero, Fernando Moreno, José Tornos, José Jorge Gil, Javier Guallar (1972-1984) y las de Juan Antonio Vallés (1992) y Juan Pablo Martínez (1994).

Otras contribuciones en aspectos cuánticos de la óptica han tenido lugar por parte de José Fernando Cariñena (Departamento de Física Teórica) que ha aplicado la teoría de la simetría de sistemas dinámicos hamiltonianos al estudio de sistemas ópticos con simetría, demostrando previamente que un sistema óptico puede considerarse como una transformación simpléctica entre variedades simplécticas y llegando a obtener la estructura simpléctica del espacio de rayos de luz en medios con índice de refracción constante o con gradiente de índice. Todo esto permite estudiar las propiedades de los sistemas ópticos desde otro punto de vista diferente al habitual. Por otra parte ha abordado la aplicación del formalismo de la matriz de transferencia a diferentes sistemas ópticos unidimensionales y sin pérdidas, tales como lentes, multicapas, superredes, cristales fotónicos y resonadores ópticos. La factorización de la matriz de transferencia como producto de otras matrices básicas y el uso de la geometría hiperbólica permiten un conocimiento más profundo de los procesos que tienen lugar en los dispositivos estudiados.

Holografía y metrología óptica.

En la década de los 80 fueron extinguiéndose las líneas de trabajo iniciadas por Yzuel y Bernabéu debido a su traslado en 1982 (esta última línea se mantuvo a cargo de Álvarez y Amaré durante un tiempo) y comenzaron otras. A su vuelta a Zaragoza Quintanilla inició una línea sobre holografía y también una colaboración con Savirón aplicando técnicas de metrología óptica a la dinámica de fluidos. En este tema realizó la tesis doctoral María Pilar Arroyo (tras sus estancias en el CEN Saclay y en la Universidad Libre de Bruselas) e inició una línea de trabajo.

La línea de holografía se orientó hacia el diseño y construcción de elementos ópticos holográficos, utilizando placas comerciales de haluros de plata como medio de registro. Combinando hologramas superficiales y de volumen desarrollaron formulaciones para determinar las aberraciones y la eficiencia. El estudio previo del comportamiento de lentes uniaxiales y biaxiales llevó a conseguir las ventajas de ambos tipos de lentes (aberraciones limitadas y buena eficiencia) mediante sistemas compuestos de dos o cuatro lentes biaxiales, que eran equivalentes a una uniaxial. El estudio de la difracción cónica permitió realizar diseños con mayor campo imagen y el estudio de lentes holográficas anamórficas dio lugar a la obtención de procesadores analógicos para aplicarlos en velocimetría de imagen de partículas. La puesta en marcha de técnicas de registro holográfico mediante gelatinas dicromatadas (con alto rango dinámico en la modulación del camino óptico) condujo a un diseño más simple y elegante de lente holográfica (la lente holográfica uniaxial de campo compartido).

Además de lentes holográficas se diseñaron y construyeron otros tipos de elementos ópticos holográficos tales como monocromadores con buena resolución, divisores de haz de amplitud variable, polarizadores, compresores de pulsos ultracortos e intensos usando gelatinas dicromatadas (en colaboración con la Universidad de Salamanca para la generación de vórtices ópticos) y sistemas para concentrar la radiación solar sobre células fotovoltaicas eliminando el calentamiento por radiación infrarroja (en colaboración con la Universidad de Lérida). Además de esto se puso en marcha la técnica de interferometría holográfica (utilizada en la línea de metrología óptica) y se llevó a cabo una colaboración con el Almaden Research Center de IBM para el estudio de la optimización del almacenamiento holográfico de datos.

La línea de metrología óptica comenzó con el desarrollo de la velocimetría de imagen de partículas (PIV) para el estudio de flujos convectivos de Rayleigh-Benard. Esto supuso la construcción de la célula convectiva (sembrada con partículas difusoras), la puesta en marcha

de un sistema de captación de imágenes y la deducción de algoritmos para su procesado digital, así como la obtención y análisis de los campos de velocidades (a partir de las medidas de múltiples planos del fluido) lo que permitió mostrar la estructura helicoidal del flujo. Posteriormente se investigó en la técnica de interferometría holográfica (sola o combinada con PIV) para el estudio de flujos de Rayleigh-Benard, la técnica de medida simultánea de velocidades y tamaños de partículas (con PIV normal o estereoscópico e interferometría holográfica) para su aplicación al estudio de flujos bifásicos convectivos y la técnica de interferometría de moteado digital aplicada a velocimetría de fluidos (cuyos registros se podían considerar como hologramas digitales).

Utilizando esta técnica se llevaron a cabo trabajos de colaboración con el grupo de Superconductividad Aplicada del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, demostrando que se podía utilizar en materiales superconductores para estudiar su degradación superficial y la aparición de inhomogeneidades en su transición al estado normal. También la utilizaron para la determinación de patologías en animales de peso reducido (en colaboración con la empresa Instrumentación y Componentes), desarrollando una plataforma de fuerzas basada en la medida de la pequeña deformación producida por las fuerzas de apoyo de estos animales. Últimamente se ha dedicado un considerable esfuerzo para posibilitar el uso de las técnicas anteriormente desarrolladas en aplicaciones biomédicas, entre las que cabe destacar la medida de campos de velocidades y deformaciones en vasos sanguíneos.

En las líneas de holografía y metrología óptica se realizaron las tesis doctorales de María Pilar Arroyo, Nieves Andrés, Alfonso Blesa, Jesús Atencia, Virginia Palero, María Pilar Bernal, Ana María López, Julia Lobera, María Victoria Collados, Sara Recuero, Ayalid Villamarín y Laura Angélica Arévalo (1987-2015).

Iluminación y colorimetría.

Otra dos líneas de trabajo en las que se ha realizado investigación y desarrollo son las de iluminación (iniciada por Aporta) y la de colorimetría (iniciada por Negueruela). En la línea de iluminación se diseñaron numerosas familias de luminarias para diferentes empresas (Lledó, Antares-Floss, Trilux Zalux, Lamp, Dimar, Xenon, Ilusol), se elaboraron programas para el cálculo de iluminación (de interior, exterior y emergencia) implantados en más de 15 empresas del sector de iluminación y se realizó la simulación del comportamiento de la luz en instalaciones singulares (Torre Agbar de Barcelona, T4 del Aeropuerto de Madrid, remodelación del estadio Santiago Bernabéu, City Metropolitana y Plaza de las Arenas en Barcelona, varios auditorios,..) incluyendo cálculos de la carga energética. Por otra parte se

llevó a cabo la fabricación y montaje de dispositivos y componentes (fotogoniómetros, esferas integradoras, bancos de calibrado,..) para laboratorios de ensayos de luminarias y calibraciones de luz y color de diferentes empresas (Tecnoluz, LSLuz, Odel-Lux, Aido, Información Tecnología y Mercado) y el diseño de sistemas para la caracterización rápida de mapas lumínicos en instalaciones de alumbrado interior y exterior.

En la línea de colorimetría se desarrollaron (en colaboración con empresas del sector de la alimentación) métodos para obtener características (conservación, madurez, valor nutricional, calidad,..) de algunos alimentos: vinos, aceites, aceitunas, hortalizas, frutas, zumos, miel, carne, pan y bollería. Se utilizaron técnicas de espectrofotometría de transmisión, espectrorradiometría de reflexión y análisis digital de imágenes producidas por retrodifusión de luz láser. En todos los casos estudiados se elaboraron algoritmos que permitiesen reconstruir el espectro mediante medidas para un número muy reducido de longitudes de onda y así determinar las coordenadas de color de una forma sencilla y precisa. De esta manera consiguieron mejorar otros métodos existentes. Con ellos estudiaron las relaciones entre el color o su variación y las características a determinar en los alimentos. En el estudio de los modelos necesarios utilizaron técnicas de análisis de componentes principales, regresión lineal por mínimos cuadrados parciales, regresión no lineal por mínimos cuadrados en máquina de soporte de vectores y reducción de variables por técnicas de información mutua. También se desarrolló un estudio sobre comportamiento del color en las mezclas de pigmentos.

De las líneas de iluminación y colorimetría surgieron las tesis doctorales de José Federico Echávarri, Manuel Celso Juárez, Fernando Ayala, Begoña Hernández, Ana María Lomas, Sara Isabel Remón, Manuela Abril, Pilar Renet Hermoso, Valentín Pérez-Caballero y Victoria Lafuente (1987-2015).

Fibras ópticas y estructuras de multicapas y de óptica integrada.

En la década de los 80 comenzó un fuerte desarrollo de la ciencia y tecnología de fibras ópticas, que condujo a un progreso enorme de las comunicaciones ópticas y dio lugar al estado actual de Internet. El trabajo en fibras ópticas para telecomunicaciones se había iniciado en Zaragoza en la empresa Cables de Comunicaciones. Calvo se incorporó a ella al principio de los 80 y Francisco Villuendas a mitad de la década, cuando Pelayo inició la línea de fibras ópticas en la Facultad de Ciencias en colaboración con dicha empresa. Al final de la década, Rebolledo (que a su vuelta de Santander había organizado una colaboración sobre estadística de fotones, con algunos profesores del Departamento de Física Fundamental)

inició una línea de trabajo sobre fibras ópticas activas, dada la importancia que estaban adquiriendo los amplificadores de fibra óptica. El trabajo en ambas líneas (a las que se incorporaron también Álvarez, Tornos y Vallés) se llevó a cabo en estrecha conexión con los proyectos europeos COST 217 y 241 (1988-1998) sobre fibras ópticas, parcialmente dirigidos por Pelayo, Rebolledo y Vallés.

En la línea de fibras ópticas se comenzó por una parte con el cálculo de la propagación de modos y la elaboración de métodos de caracterización y por otra parte con el desarrollo de sensores basados en plasmones superficiales en una intercara metal-dieléctrico. Esto permitió el estudio de dispositivos basados en el acoplamiento entre luz guiada en fibras ópticas y estructuras planas de capas metálicas y dieléctricas (depositadas en el revestimiento pulido de la fibra), que llevó al diseño y construcción de sensores de índice de refracción, polarizadores, filtros polarizantes y multiplexores en longitud de onda. Los resultados iniciales dieron pie a la creación de Fibercom como empresa spin-off dedicada a la instalación de redes de fibra óptica y a la fabricación de componentes para dichas redes. Como la multiplexación en longitud de onda y la amplificación habían aumentado considerablemente la potencia propagada, comenzaban a ser importantes los efectos de penalización que introducían en las fibras los fenómenos no lineales. Por este motivo, elaboraron modelos teóricos y técnicas experimentales para el estudio de difusión Brillouin y Raman estimuladas, mezcla de ondas e índice de refracción no lineal. Esto condujo a un método nuevo para el análisis de espectros con alta resolución (fundamentado en el efecto Brillouin estimulado) y a un analizador de espectros basado en él (BOSA). El estudio posterior de un método para medir el estado de polarización a través de todo el espectro permitió el desarrollo de un polarímetro con resolución espectral que fue implementado en el BOSA. A raíz de esto se creó la empresa Aragón Photonics como spin-off para fabricar y comercializar dicho equipo, que se distribuye hoy en día por todo el mundo en laboratorios de universidades, centros de investigación y empresas y que, en Zaragoza, ha permitido caracterizar láseres de semiconductor y de otros tipos y analizar el comportamiento de la polarización en sistemas de comunicación por fibra óptica, con alta resolución.

Otro tema de trabajo ha sido el estudio teórico y la producción de recubrimientos multicapa (depositados sobre vidrio) para el control óptico y energético, en colaboración con Ariño Duglass. Estos vidrios se han instalado en edificios dentro y fuera de España, así como en vehículos de transporte (ferroviario principalmente). Últimamente se han diseñado recubrimientos decorativos para electrodomésticos en colaboración con BSH. Finalmente hay que hacer mención de los trabajos realizados sobre sensores optoquímicos basados en guías

de onda integradas (en colaboración con la Universidad Autónoma de Barcelona y el Centro Nacional de Microelectrónica de Barcelona) y el desarrollo de espectrofotómetros para análisis de aguas en colaboración con Adasa Sistemas.

La línea de fibras ópticas activas se inició poniendo en marcha métodos numéricos de cálculo de ganancia y fluorescencia amplificada en fibras dopadas con erbio (posteriormente se hicieron algunos trabajos con praseodimio), instalaciones de amplificación y técnicas de medida, para tratar de conseguir procedimientos de optimización de dispositivos. Se mejoraron los algoritmos numéricos de cálculo introduciendo nuevos factores de solapamiento (dependientes de las potencias propagadas en la fibra) que sirvieron para encontrar métodos de cálculo basados en expresiones analíticas y nuevas técnicas de caracterización. El hallazgo de desfases en señales amplificadas con potencia modulada a baja frecuencia, permitió posteriormente hacer estudios sobre propagación de modos a velocidades de fase más lentas o más rápidas que la de la luz. La introducción de bombeo modulado en forma de onda cuadrada condujo al desarrollo de una nueva técnica de caracterización basada en la dinámica de la fluorescencia. El paso siguiente fue extender los métodos experimentales y de cálculo a guías dopadas con erbio e iterbio, integradas en sustratos de niobato de litio o vidrio. Introduciendo los mecanismos cooperativos de transferencia no radiativa de energía (debidos a la alta concentración de dopante) se encontraron nuevos métodos de caracterización y se consiguió simular con éxito el comportamiento de las guías amplificadoras.

El interés que habían despertado los láseres de fibra óptica dopada con erbio llevó a elaborar modelos de cálculo (numéricos y analíticos) y nuevas técnicas de caracterización de las fibras. Esto hizo posible la construcción de láseres de emisión continua (con diferentes tipos de espejos y con selección de longitud de onda o multilínea) y pulsantes (con los que últimamente están generando emisión supercontinua en fibras altamente no lineales). Al estudiar la dinámica de estos láseres se encontraron comportamientos no lineales de interés tales como biestabilidad, bifurcaciones o rutas de caos. Los atractores caóticos de los láseres fueron estudiados posteriormente, mediante análisis topológico, para diversas aplicaciones.

En los últimos años los esfuerzos se han dirigido a los tipos de fibras y guías de más actualidad tales como fibras de cristal fotónico (en colaboración con la Universidad de Valencia) y guías escritas con pulsos ultracortos de luz láser (en colaboración con el Instituto de Óptica del CSIC en Madrid). En ambas colaboraciones ha sido esencial la medida de características y el uso de modelos teóricos para conseguir la optimización de las prestaciones de fibras, guías y dispositivos hechos con ellas, lo que ha permitido obtener amplificadores y

láseres competitivos a nivel internacional. Los últimos trabajos se han orientado hacia el desarrollo de dispositivos tales como sensores con fibra de núcleo suspendido, resonadores de microanillo e interferómetros modales, que incluyen iones activos.

Estas dos líneas de trabajo han sido el origen de las tesis doctorales de Francisco Villuendas, Joaquín Paniello, Sebastián Jarabo, Rafael Alonso, Jesús Subías, Juan Ignacio Garcés, Juan Carlos Martín, José Antonio Lázaro, Íñigo Salinas, Alejandro Escuer, Carlos Heras, Íñigo Sola, José Manuel Marco, Javier Used, Cristina Pelayo, José Antonio Sánchez, Víctor Berdejo, Pascual Sevillano y Enrique Carretero (1990-2016).

Óptica visual.

Una nueva actividad sobre óptica visual se inició al trasladarse Rafael Navarro a la Facultad de Ciencias en 2002 y al implantarse los estudios de Óptica y Optometría en 2005. Se incorporaron a esta línea Aporta, Collados, Jorge Ares y Ana Sánchez. Se construyó un aberrómetro ocular de gran campo (para evaluar la calidad óptica del ojo mediante el análisis del frente de onda) y se elaboraron diferentes algoritmos teóricos (para obtener parámetros característicos del ojo y de la función visual a partir de las medidas) que posteriormente han permitido realizar investigaciones diversas. Se ha conseguido obtener modelos ópticos avanzados de la córnea, el cristalino (modelo adaptativo de la distribución de índice de refracción) y el sistema visual (modelo de agudeza visual) y se han aplicado al estudio de cambios del sistema visual con la edad, así como a cirugía refractiva, control de calidad en óptica oftálmica y visión artificial. También se ha estudiado la contribución relativa de las aberraciones y la difusión intraocular a la calidad óptica del ojo. En los últimos trabajos se ha desarrollado un sistema para realizar una valoración objetiva de la discriminación visual en modelos degenerativos neuroretinianos (mediante seguimiento optocinético) y un software que analiza las imágenes que se forman en la retina y evalúa errores refractivos (para poder desarrollar métodos de compensación refractiva más eficaces). Con estos temas han llevado a cabo sus tesis doctorales Fernando Palos, José Ricardo Rivera, Pablo Rodríguez, Francisco Javier Segura y Sara Perches (2011-2016).

El espacio para escribir las historias siempre es limitado y nunca caben los nombres de todos los que han contribuido a ellas en mayor o menor grado. En homenaje a los citados y a los omitidos quiero decir que la labor realizada por todos ellos ha contribuido a que Zaragoza haya sido un centro de formación de investigadores de calidad en óptica (que a su vez han creado empresas y grupos de investigación y desarrollo en diferentes lugares de España) y de difusión del conocimiento en sus distintas ramas. Toda esta labor fue reconocida cuando se

eligió a Zaragoza como sede de la Primera Reunión Anual de la Sociedad Europea de Óptica (First EOS Annual Meeting) que tuvo lugar en 1993.