



UN NEWTON IMPRESO EN 3D

**ESTE ARTÍCULO ES LA EXPERIENCIA
DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
TELESCOPIO CON COMPONENTES IMPRESAS
EN 3D A TRAVÉS DE UN TRABAJO DE FIN
DE GRADO DE INGENIERÍA**

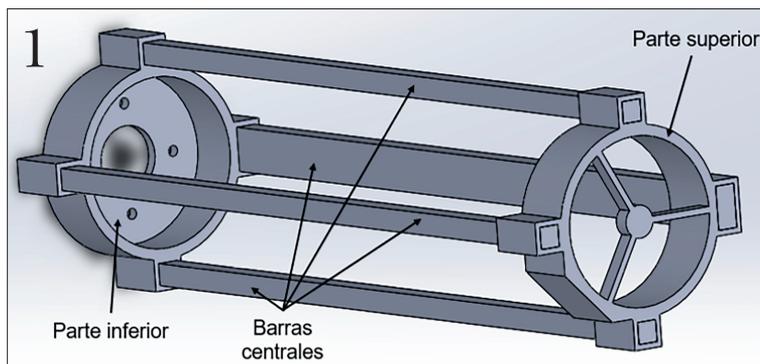
**ROGER MACÍAS QUESADA,
ANTONIO MARZOA DOMÍNGUEZ
Y ORIOL CASAMOR MARTINELL**

La impresión 3D es una tecnología que ha revolucionado el desarrollo de prototipos y los procesos de fabricación a nivel internacional debido a que simplifica mucho la obtención de piezas personalizadas con alta precisión. En los últimos años, hemos observado cómo esta tecnología se ha implementado en distintos sectores de la industria y ha ganado mucha popularidad, debido a que, generalmente, supone un ahorro económico frente a otros métodos de prototipado, más tradicionales. Esta tecnología ha llegado incluso a convertirse en un bien de uso amateur accesible para un gran público.

Concretamente, los aficionados a la astronomía han encontrado en la impresión 3D una herramienta clave para desarrollar todo tipo de utillajes para la práctica de la observación del cielo, puesto que una de las ventajas que ofrecen las técnicas de fabricación 3D es la posibilidad de adaptar y personalizar al máximo los componentes para adecuarlos a las necesidades de cada individuo.

A pesar de todas sus bondades, la impresión 3D presenta también una serie de desafíos a superar para obtener un resultado satisfactorio, especialmente si hablamos de impresoras 3D de sobremesa, como la que puede tener el aficionado medio en su casa. El principal de estos inconvenientes es la precisión de estos equipos, más que suficiente para la mayoría de los usos, pero que podría ser muy limitante a la hora de fabricar un

IZQUIERDA. Fotografía del primer autor del trabajo de fin de grado con el telescopio fabricado en 3D colocado sobre una montura ecuatorial. [Todas las imágenes son cortesía de los autores]



telescopio, que requiere de unas tolerancias muy afinadas (o de sistemas de corrección de la desalineación, en su defecto) si no se tiene en cuenta.

Otro desafío es la elección correcta del material para fabricar las piezas. Un punto en el que hay que realizar una valoración de los costes que se van a asumir, dado que en el mercado se pueden encontrar materiales de muy alto rendimiento con un coste más alto y, por supuesto, con una dificultad técnica muy superior; o materiales comunes, que resultan más económicos y sencillos de utilizar, pero que pueden producir que no obtengas las especificaciones técnicas deseadas.

A pesar de estos aspectos más complejos, la impresión 3D está demostrando hoy en día que es una tecnología clave y muy prometedora para la producción de todo tipo de útiles, y el hecho de que cada vez sea más accesible para el consumidor medio, ha provocado que a lo largo de los años se haya ido creando una comunidad de usuarios que comparten sus experiencias, diseños, consejos y conocimientos generales de la materia, los autoproclamados «makers». El factor más diferenciador de esta comunidad es que todos los proyectos son por nor-

FIGURA 1. Diseño preliminar del telescopio. El uso de las cuatro barras es un diseño simple y eficaz, fácil de implementar para conseguir un sistema funcional de forma rápida.

ma general «open source» lo cual significa que cualquiera puede modificarlos a su conveniencia para adaptarlos a sus necesidades de un modo extremadamente sencillo, si se tienen las herramientas adecuadas.

Estos individuos distribuyen su sapiencia mediante el uso de la red, en cientos de páginas web especializadas. Dada esta infraestructura digital, incluso para los más novatos es posible hoy en día realizar proyectos de una alta complejidad técnica.

En la comunidad maker se puede encontrar una gran cantidad de proyectos relacionados con la astronomía, desde el diseño de utillajes como enfocadores, oculares o incluso telescopios completos, a proyectos de motorización de monturas, fabricación de filtros polarizadores, colimadores y sistemas de captura de imagen, entre otros.

Algunos ejemplos de los proyectos más famosos son el telescopio *TelescopePrime*, la plataforma de fotografiado *OpenAstroTracker* o el telescopio PiKon. Todos estos com-

FIGURA 2. Preliminar del segundo diseño del telescopio. A) Primera iteración del conjunto celda/base. B) Esquema del sistema de colimado por tornillos pasantes.

FIGURA 3. Diseño final del telescopio. En él se observan las principales partes del modelo así como el característico diseño de tubo abierto.

FIGURA 4. Detalle de los elementos que forman la base del telescopio. Observamos la celda del espejo principal, junto con la parte inferior. Las interfaces por las que se unen las anteriores son las palancas de colimado (en rojo). Se ha eliminado el espejo primario del modelo para poder observar el sistema de colimado de un modo más claro.

binan elementos característicos del mundo de la impresión 3D, como son el bajo coste frente a alternativas comerciales, la facilidad de modificación y adaptación, el uso de materiales plásticos, etc.

En el caso que nos ocupa, nos centramos en un telescopio reflector, tipo Newton, con un diseño de tubo abierto. La idea fundamental bajo la que se diseñó este telescopio es la de crear un prototipo sencillo pero a su vez versátil y robusto, que ofrezca prestaciones atractivas de cara al astrónomo amater.

Además, se pretendía integrar un sistema que pudiera ser fácilmente ensamblado y desensamblado por un usuario inexperto, siguiendo unas instrucciones breves de montaje. Este último aspecto es, probablemente, uno de sus factores más diferenciadores frente a opciones comerciales. Así mismo, otro de los objetivos perseguidos era el de obtener una herramienta de «bajo coste» con capacidades amplias y comparables a su homólogo del mercado.

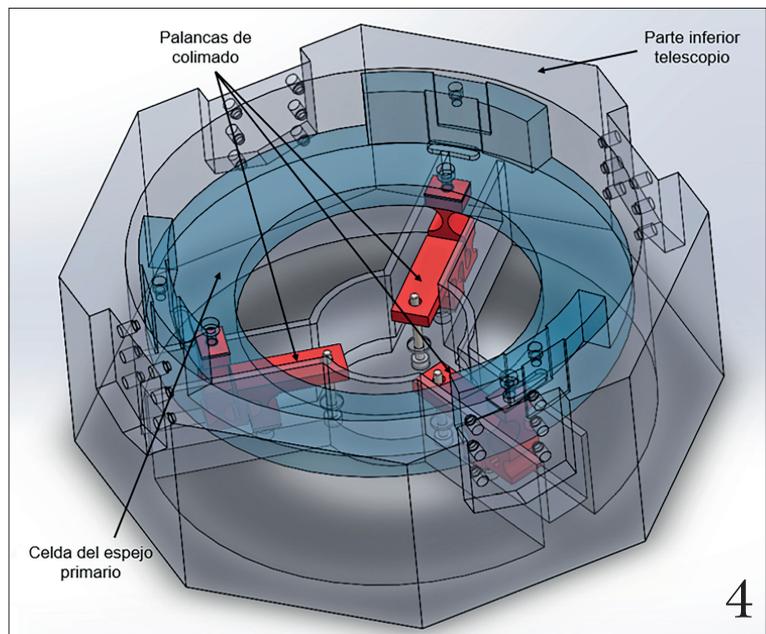
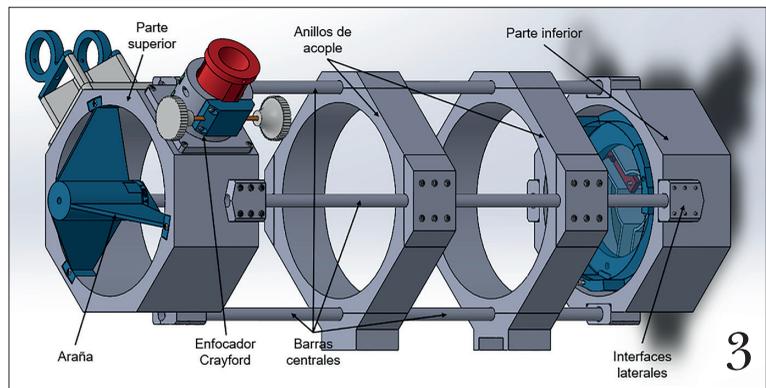
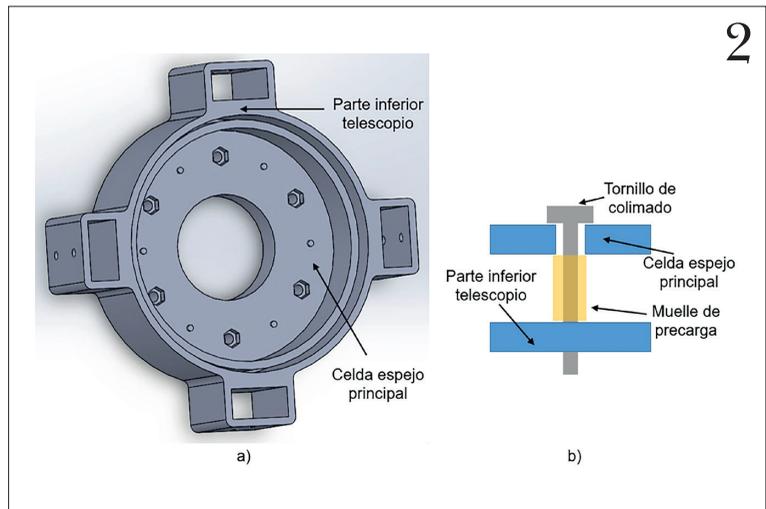
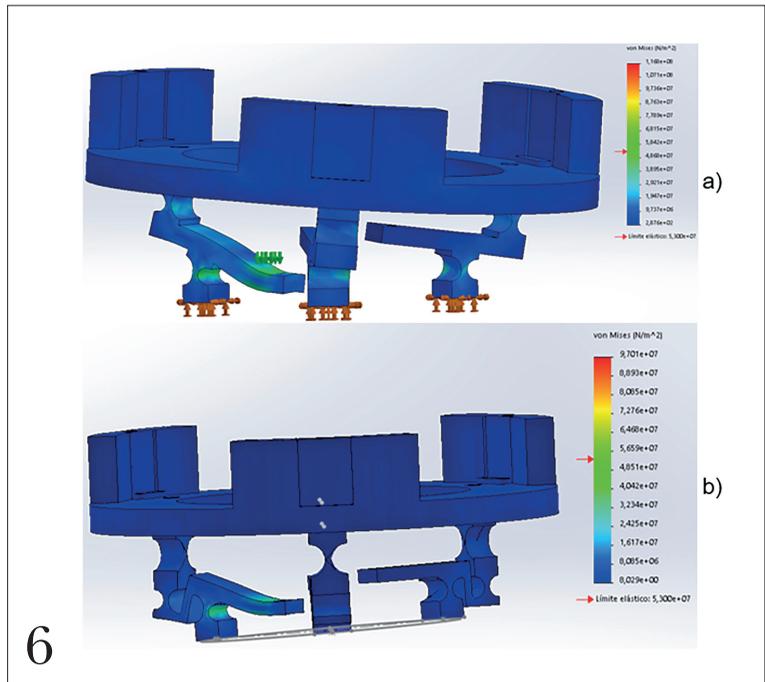
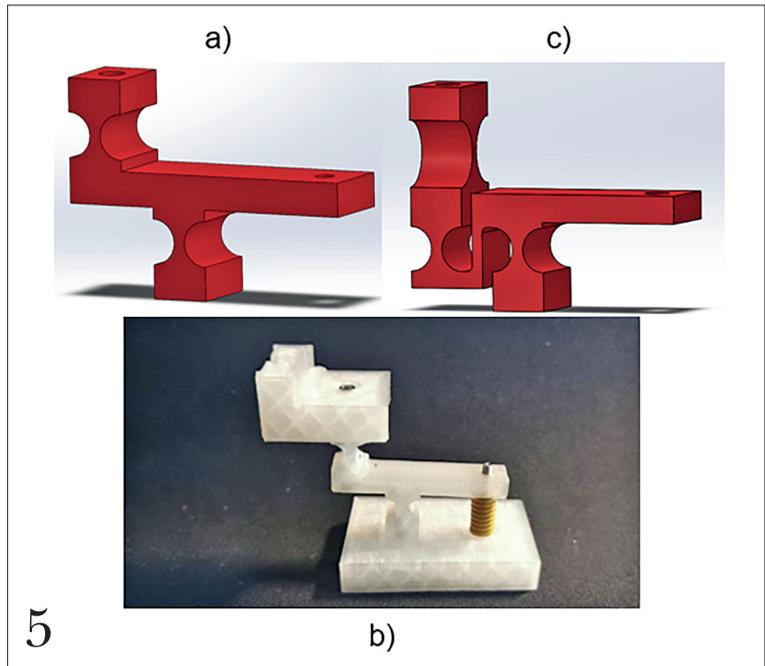


FIGURA 5. Modelos de la palanca de colimado y prototipo de testeado. A) Primer diseño de las palancas. B) Prototipo de testeado del primer diseño de las palancas. C) Diseño final de las palancas.

FIGURA 6. Comparativa del análisis de flexión de las palancas, realizado con método de elementos finitos. Se observa muy claramente como las palancas con el diseño más avanzado (inferior) trabajan mejor a torsión sin deformarse al aplicar una carga vertical en una palanca arbitrariamente.

Para comenzar la etapa de diseño se eligieron unas características básicas a modo de definir el sistema óptico. Para tener una buena relación de calidad óptica vs precio, y facilidad de obtención de componentes ópticos, se optó por un diseño tipo Newton. De entre el catálogo de espejos disponibles en la red, se optó por un espejo esférico (de bajo coste y alta disponibilidad) de 150 mm de diámetro y una focal de 750 mm, teniendo así una relación focal $f/5$. A pesar de ser más económico, hay que tener en cuenta que un espejo esférico ofrece menores prestaciones ópticas que uno parabólico (*Astronomía* 255, sep. 2020).

Para un diseño preliminar, se optó por cuatro barras que integran el cuerpo central del telescopio, las cuales iban unidas en sus extremos a dos piezas principales fabricadas con impresión 3D. Una pieza superior con la araña de sujeción del soporte del espejo secundario y una inferior donde se alojaba el espejo principal. Las barras centrales eran perfiles cuadrados de aluminio estándar que encajaban en las piezas de plástico y se sujetaban mediante tornillos y tuercas específicas (Figura 1).



A pesar de su simplicidad, este diseño se descartó debido a la poca practicidad y a que las dimensiones de este suponían dividir en componentes más pequeños las partes más grandes debido a que

no cabían en el área de fabricación de la impresora 3D, lo que dificultaba el ensamblado final del sistema. Así mismo, se consideró como diseño no apto debido a que no incorporaba un siste-

FIGURA 7. Parte superior del telescopio. Se observa el enfocador Crayford, la araña con la celda del espejo secundario y el soporte para buscador.

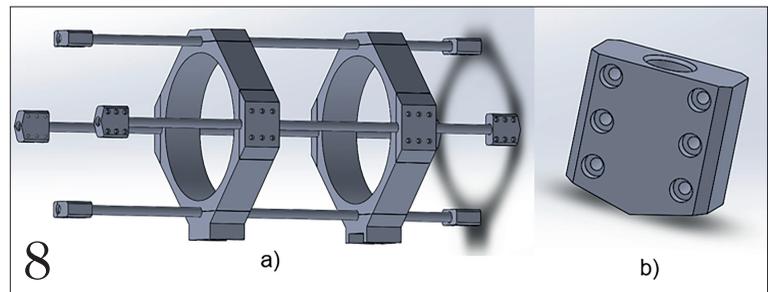
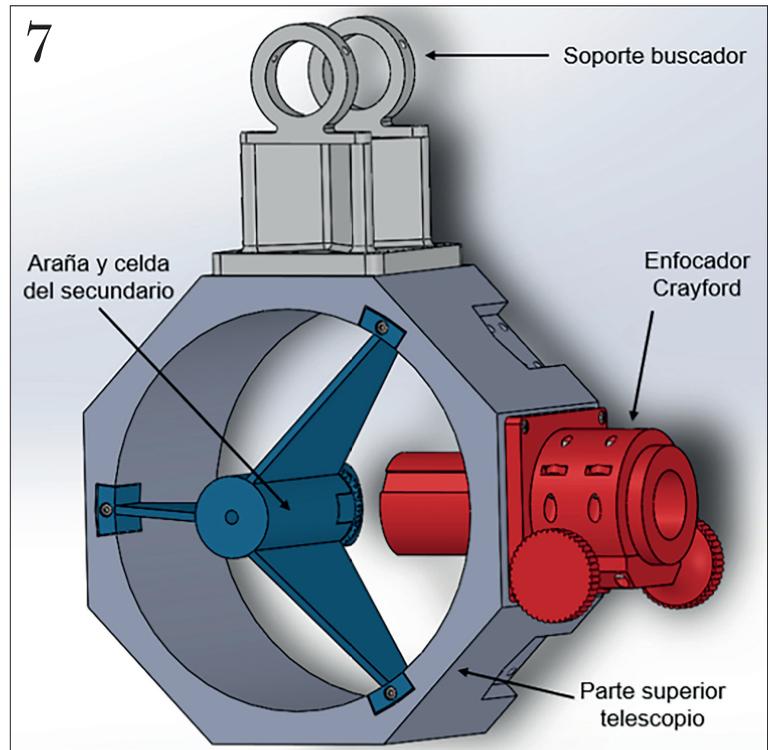
FIGURA 8. Detalle de las piezas que forman la parte central del telescopio. A) Montaje de las barras, las interfaces y los anillos centrales. B) Detalle de las interfaces.

ma de alineado de los espejos (colimado) imprescindible en cualquier telescopio Newton.

El segundo diseño se centró inicialmente en el sistema de sujeción y alineado del sistema óptico, debido a que es una de las partes más críticas del telescopio y es un factor limitante para tener en cuenta de cara al resto del modelo. El subsistema de apoyo y sujeción del espejo primario se diseñó en formato de celda compacta, a la cual el espejo iba encolado. En ella, además, se incorporaban un conjunto de tornillos precargados por muelle que traspasaban a la parte trasera del tubo de telescopio, con tal de poder colimar el primario (Figura 2).

No obstante, este diseño presentaba poca adaptabilidad por el hecho de tener que encolar el espejo primario, pues, al hacer posibles modificaciones del diseño de la celda o modificaciones del sistema en el futuro, esto podría provocar tener que desechar por completo la óptica. A la par, el sistema de alineado del espejo no podía usarse como sujeción rígida entre la celda y la parte inferior del telescopio debido a que los esfuerzos laterales causados por los movimientos del tubo causaban movimiento y por ende desalineación de los espejos.

Tras distintas iteraciones se alcanzó un diseño robusto de tubo abierto (característica com-



partida con sus predecesores) conformado por dos partes principales impresas en 3D y una estructura central a base de barras cilíndricas huecas de aluminio y anillos octogonales de plástico (Figura 4). A partir de ahora nos referiremos a cada una de estas partes por separado y describiremos sus principales características. En este modelo, todas las piezas van atornilladas entre sí mediante tornillos hexagonales Allen, y roscan en insertos de latón que se colocan en las pie-

zas impresas en 3D mediante calor y presión.

La parte inferior del tubo del telescopio consiste en una base octogonal que contiene el sistema de colimado y la celda del espejo primario (Figura 5). Esta es con total seguridad la parte más crítica del diseño, debido que requiere de un compromiso clave de precisión y rigidez, de modo que se pueda operar satisfactoriamente.

En este diseño, el espejo primario se coloca sobre una celda y se

FIGURA 9. A) Comparativa de tamaño de ambos telescopios. B) Comparativa diurna de los telescopios [a la izquierda, observamos los resultados captados por el telescopio comercial, mientras que a la derecha los obtenidos por el telescopio impreso en 3D, a igualdad de condiciones atmosféricas y de montaje]. La imagen tomada con el Newton 3D resulta más contrastada, a pesar de perder detalle debido a un espejo principal de menor calidad que el del Meade. C) Comparativa de imágenes de la Luna usando un ocular de mismas características [superior telescopio 3D, inferior Meade], de nuevo observamos más contraste en la imagen del telescopio en 3D, con una buena resolución y detalle de los cráteres lunares.

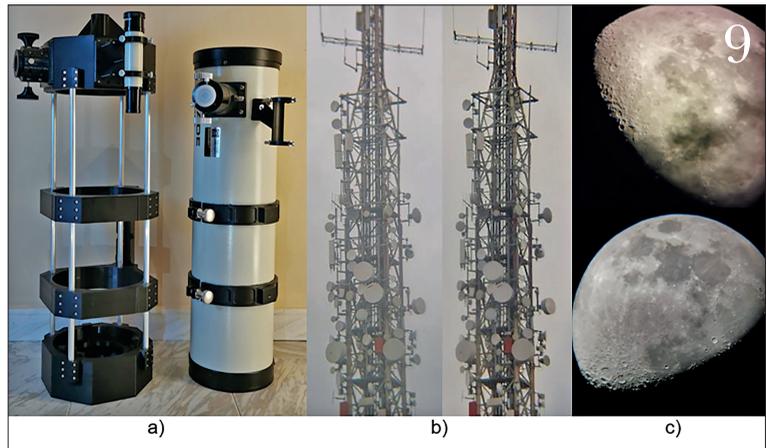
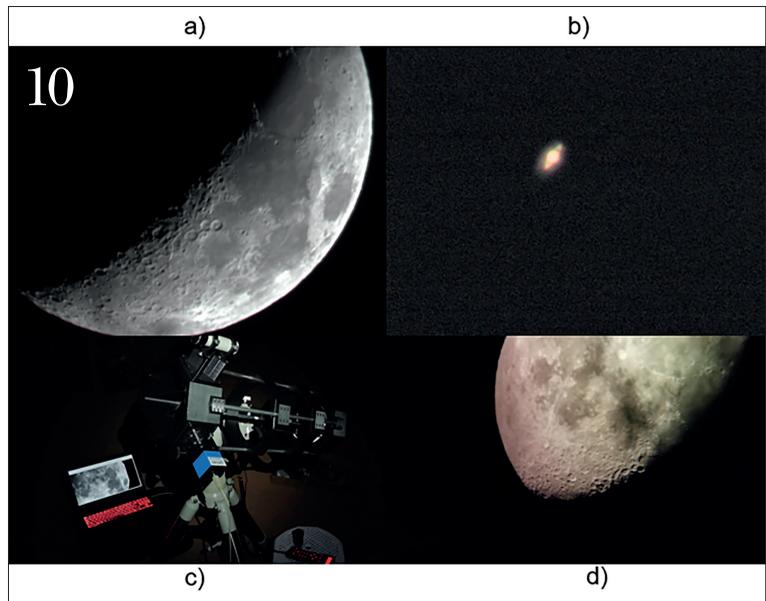


FIGURA 10. Resumen de resultados de astrofotografía. A) Imagen de la Luna tomada con un ocular de 10 mm. B) Imagen de Saturno tomada con un ocular de 10 mm. C) Fotografía del montaje de observación astronómica. D) Fotografía de la Luna tomada en distintas condiciones atmosféricas con un ocular de 10 mm.



fija a ella mediante unos clips de presión para evitar su movimiento. La celda a su vez descansa acoplada a unas palancas que tienen una doble función: soportar el sistema óptico principal y actuar en el plano vertical para poder alinear precisamente el eje óptico del espejo.

Para diseñar estas palancas, se intentó adaptar uno de los sistemas más comunes de colimado de los telescopios de gran tamaño (las monturas de Hindle) y el principio de los mecanismos flexibles, que permiten la actuación mediante la aplicación de una fuerza. Este tipo de mecanismo es muy sencillo de obtener usando impresión 3D si se juega con las debidas secciones de las piezas que deben flexionar. Las palancas van precargadas por un muelle que facilita su uso y se accionan

mediante tornillos colocados en la parte trasera del telescopio.

Para optimizar al máximo el diseño en términos de efectividad y sencillez, se colocan únicamente tres palancas separadas entre sí 120° en pos de la simetría y el reparto efectiva de las cargas (Figura 4).

Las palancas pasaron por un exhaustivo proceso de diseño en el que sufrieron distintas modificaciones. El primer modelo de palanca constaba de dos puntos de pivote con una sección me-

nor que el resto de la palanca para favorecer la flexión en la dirección radial, como se observa en la Figura 6a.

Para comprobar el correcto funcionamiento de este sistema, se fabricó un prototipo para comprobar la correcta flexión sin fractura de los pivotes de flexión (Figura 5b).

No obstante, este diseño fue sustituido debido a que no contemplaba las flexiones laterales del conjunto y afectaba al rendimiento del sistema. Para contra-

rrestar estos efectos se añadió un tercer pivote, esta vez para soportar las deformaciones axiales, solucionando así el problema (Figura 5c). Además, para simular el comportamiento de todo el conjunto, se utilizó el método de elementos finitos para calcular la rigidez y la flexión de las palancas en ambos casos del diseño.

La caja inferior que contiene el sistema de colimado y soporte del espejo principal se adaptó con tal de reducir el peso, pero maximizando su rigidez, combinando conceptos estructurales y de impresión 3D, como son las vigas en U y el relleno variable de las piezas impresas.

Como ya se ha apuntado, la parte central del telescopio está principalmente formada por cuatro barras huecas de forma cilíndrica de aluminio y dos anillos centrales impresos en 3D. Los anillos cumplen la función de punto de acople para añadir una cola de milano al telescopio, con tal de poderlo colocar sobre una montura, además de añadir rigidez al modelo.

La parte superior del telescopio está constituida por un anillo exterior octogonal, que incorpora partes cruciales como son: la araña y la celda del espejo secundario (que va precargada con un muelle y se puede colimar mediante tres tornillos hexagonales unidos a la araña), el enfocador de tipo Crayford, que permite colocar un ocular de 1,25" y operarlo con tal de obtener una imagen nítida para cualquier observador, y un acoplamiento para añadir un buscador (Figura 7).

Las tres partes que conforman el telescopio se unen por unas interfaces de acople encoladas a los extremos de las barras centrales

del modelo. A través de seis tornillos hexagonales, todas las interfaces de unión se acoplan y quedan fijadas, permitiendo también un desmontaje rápido y sencillo en caso de que el telescopio requiera ser transportado (Figura 8).

La etapa lógica posterior al desarrollo es la de prueba y evaluación. Para el calificado del telescopio se llevaron a cabo un conjunto de observaciones (tanto terrestres como astronómicas), utilizando la montura y soporte de un telescopio equivalente de la marca Meade (modelo LXD 75 152/762). Las observaciones se realizaron con ambos sistemas, para comparar las funcionalidades del equipo desarrollado con un sistema comercial asequible para el aficionado medio. El resultado de la comparativa es muy claro: la combinación de todos estos elementos resulta en un modelo funcional, que permite la práctica de la observación astronómica, sobre todo de objetos locales. Una muestra de los resultados se observa en la Figura 9, en que se comparan distintos aspectos de los dos telescopios.

El prototipo ha ofrecido resultados que superan con creces las expectativas, teniendo en cuenta el uso de un sistema óptico muy económico y de baja calidad. En la Figura 10 se pueden observar algunas imágenes tomadas durante la observación (tanto con el Meade como con el telescopio impreso en 3D) para comparar.

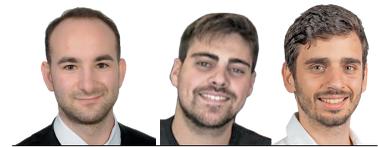
El diseño de tubo abierto contribuye a la rápida aclimatación del telescopio en cualquier condición de temperatura, sin verse en ningún momento afectado por interferencias causadas por luz externa. Además, el sistema de colimado demuestra que su ope-

ración es sencilla y efectiva, tanto para el espejo primario como el secundario.

Los autores de este trabajo esperamos que compartir esta divertida e interesante experiencia ayude a motivar a más aficionados a probar procedimientos similares para desarrollar sus propios equipos. Y estaremos encantados de compartir recursos, esfuerzos, ideas y demás con toda la comunidad. (A)

BIBLIOGRAFIA

- J. Prusa, M. Bach, *Basics of 3D printing with Josef Prusa*, Prusa Research S.A. (2019).
- TelescopePrime*: www.telescope-prime.pl
- OpenAstroTracker*: wiki.openastro-tech.com/en/OpenAstroTracker
- PiKon: pikon.com
- R. Macías, A. Marzoa, O. Casamor, D. Fernández, «3D printed telescopes: an interesting tool for teaching astronomy, science and technology», 4th SSEA, *10.5821/conference-9788419184405.104* (2022).



Roger Macías Quesada, Ingeniero Aeroespacial por la EETAC (Universidad Politècnica de Catalunya, UPC) y actualmente cursando estudios de Máster en la ESEIAAT. **Antonio Marzoa Domínguez**, Ingeniero en SENER Aeroespacial, profesor asociado del Departamento de Física de la UPC y miembro de COSMOS Mataró. **Oriol Casamor Martinell**, Ingeniero en SENER Aeroespacial y profesor asociado del Departamento de Física de la UPC.