

03-010

PRODUCT ENGINEERING APPLIED TO INNOVATIVE PRODUCT DESIGN. CASE OF AN ARTICULATED OPERATING THEATRE LIGHTING SYSTEM

Sánchez-Barroso, Gonzalo; García Sanz-Calcedo, Justo; López Rodríguez, Fernando

Universidad de Extremadura

The paper shows the engineering phase development applied to product design within an R&D&I project in an academic environment. The objective of this work was to acquire skills related to an innovative product development based on Product Engineering and R&D&I Project Management. Accomplishment of the set objectives was ensured by dividing the work into three different parts. Firstly, the State of the Art and an appropriate scientific-technological contextualisation of problems surrounding operating theatre luminaires were carried out. Subsequently, the Management Plan for this R&D&I project was developed regarding this innovative product design. Finally, a design and three-dimensional modelling of an articulated operating room luminaire technical project was supported by the Product Engineering guidelines. It was concluded that undertaking this kind of transdisciplinary projects in multidisciplinary engineering teams provides students with job niches with enormous professional projection in very short term.

Keywords: *Product Engineering; Project Management; Teaching*

LA INGENIERÍA DE PRODUCTO APLICADA AL DISEÑO DE PRODUCTOS INNOVADORES. CASO DE UNA LUMINARIA DE QUIRÓFANOS ARTICULADA

El trabajo muestra el desarrollo de la fase ingenieril aplicada al diseño de productos dentro de un proyecto de I+D+i en el ámbito académico. El objetivo del trabajo era adquirir las competencias relativas al desarrollo de productos innovadores basándose, por tanto, en la Ingeniería de Productos y de la Gestión de Proyectos de I+D+i. Para ello, el proyecto se articuló en tres partes diferenciadas que aseguraron la consecución de los objetivos planteados. En primer lugar, se realizó el Estado del Arte y la contextualización científico-tecnológica adecuada de la problemática que rodea a las luminarias de quirófanos. Posteriormente, se desarrolló el Plan para la Dirección del Proyecto de I+D+i pertinente para el diseño de dicho producto innovador. Finalmente, se realizó el proyecto técnico que consistió en el diseño y modelización tridimensional de una luminaria de quirófanos articulada y se apoyó en las directrices de la Ingeniería de Productos. Se concluyó que acometer esta clase de proyectos transdisciplinares en equipos ingenieriles multidisciplinares proporciona al alumno nichos de trabajo con enorme proyección profesional a muy corto plazo.

Palabras clave: *Ingeniería de Productos; Gestión de Proyectos; I+D+i; Docencia*

Correspondencia: Gonzalo Sánchez-Barroso Moreno gsanchezmoreno@gmail.com



©2019 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La ingeniería de productos es una de las ramas industriales que se encarga del diseño y desarrollo de productos identificando las necesidades y demandas de la sociedad. Para ello, aplican técnicas tan variadas como la psicología y las tecnologías de fabricación. Esta amplitud del campo de trabajo permite el diseño y desarrollo de productos innovadores, satisfaciendo esa demanda de la sociedad, ya sea explícita o implícita.

Los quirófanos deben mantener un nivel de limpieza suficiente para asegurar que los elementos que hay en su interior, a parte del material quirúrgico, no puede provocar una infección en el paciente. Sánchez-Barroso, García Sanz-Calcedo y G. González (2018) y Sánchez-Barroso, García Sanz-Calcedo y Marcos Romero (2019) estudiaron la influencia de la velocidad del aire de impulsión y la sobrepresión de la sala sobre el paciente y personal médico presente en quirófanos de altas prestaciones.

Asimismo, las prestaciones que se le exigen al equipamiento de quirófano son superiores a sus exigencias cotidianas. Este es el caso de la luminaria de quirófanos. El propósito de las luminarias quirúrgicas es proporcionar una iluminación óptima de la zona de intervención para la visualización de los objetos pequeños de bajo contraste que se encuentren en el interior de incisiones y/o cavidades del cuerpo. Las luminarias deben estar diseñadas con un doble objetivo: 1) minimizar la producción de sombras, debido a la interrupción por parte del equipo médico y 2) minimizar la distorsión del color de los elementos que alumbra, ya que puede provocar confusión a la hora de identificar la sintomatología. Se les pide, además, que puedan funcionar durante largos períodos de tiempo continuado sin emitir excesivo calor, ya que esto provocaría tanto la interrupción del flujo de aire de climatización como podría reseca la zona del paciente que está iluminada.

Otra de las necesidades identificadas en la bibliografía es el movimiento de la lámpara después de haber sido posicionada (desvío). Se identifica como un problema significativo, puesto que requiere un reposicionamiento repetido. Algunas lámparas tienen cerraduras magnéticas que son diseñadas para evitar este problema; sin embargo, hasta la fecha no existe un procedimiento establecido mediante el cual pueda ser cuantificada la desviación (Zoon, van der Heijden, Loomans, & Hensen, 2010).

El objetivo de este trabajo es documentar el proceso de diseño de productos innovadores en ambientes de trabajos académicos mediante equipos multidisciplinares, aplicado al caso de una luminaria de quirófano articulada (LUQUIRAR).

2. Metodología

La metodología planteada para realizar este trabajo consistió en simular el proceso completo por el que debe pasar una empresa o institución que desea llevar a cabo el diseño de un producto innovador participando en convocatorias para obtener financiación, pública o privada, en concurrencia competitiva.

Para ello, el primer objetivo planteado fue obtener la financiación que permita realizar las investigaciones necesarias para, posteriormente, diseñar el producto objeto del proyecto. El segundo objetivo fue utilizar los resultados y conclusiones de esas investigaciones para desarrollar el producto.

La primera fase, por tanto, consistió en elaborar la documentación para participar en la convocatoria de ayudas a la I+D+i organizada por un organismo ficticio. Para ello se elaboró el proyecto de I+D+i, que sería evaluado por el comité científico designado por este organismo financiador. Fruto de esta evaluación se obtendría la relación de proyectos participantes que resultan beneficiarios de la misma. Para poder continuar con la segunda fase, se asumió que

la propuesta había resultado aceptada. Al desarrollarse este trabajo en el ámbito académico, no resultó factible llevar a cabo las investigaciones planteadas en el proyecto de I+D+i cuyos resultados se usarían para la siguiente fase. En la segunda fase se elaboró la documentación para la definición de LUQUIRAR, es decir, el proyecto técnico para lo cual se usó el software de diseño paramétrico Autodesk Inventor®.

El proyecto de I+D+i se elaboró modificando las estructuras propuestas por los principales organismos de investigación a la hora de participar en sus convocatorias de ayuda a la I+D+i. En concreto, se empleó la siguiente estructura: memoria, plan para la dirección del proyecto, presupuesto, seguimiento y control del proyecto y plan de explotación de resultados.

En la memoria, se realizó el Estado del Arte para la contextualización científico-tecnológica de las investigaciones que serían necesarias realizar para el diseño del producto. El plan para la dirección del proyecto de I+D+i y el procedimiento para llevar a cabo el seguimiento y control del mismo se elaboró conforme a las directrices propuestas en la Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Project Management Institution, 2018). Y en el plan de explotación de resultados se definió la transferencia de conocimiento que se hará a la sociedad.

Por su parte, el Proyecto Técnico para la definición del diseño del producto, así como su modelización tridimensional, se estructuró en los cuatro documentos clásicos: Memoria y sus Anexos, Pliego de Condiciones, Estado de mediciones y Presupuesto, y Planos.

3. Resultados y discusión

3.1 Proyecto de I+D+i

La estructura de descomposición del trabajo (EDT) propuesta se muestra en la Figura 1. Cada una de las ramas verticales es un paquete de trabajo (*Work package*, WP) planteado, colgando del cual están las actividades necesarias para llevarlos a cabo. Cada ítem de la EDT está codificado para su adecuada identificación en el diccionario de la EDT y en las posteriores referencias que se hacen a él.

En la Figura 2 se muestra un ejemplo de la especificación que se elaboró para cada WP. Para su definición completa se identifica el WP por su número y por su título. A continuación se describen las actividades que se llevarán a cabo, se identifica con qué objetivos planteados para la investigación están relacionados las actividades de este WP y se enumeran las actividades. Asimismo, se indica el/los responsables del WP, los participantes, y el período y lugar de ejecución. Finalmente, se enumeran los hitos que se alcanzarán y los entregables que son salida de este WP.

Cabe mencionar el plan de gestión de los recursos humanos. Este se realizó mediante la definición del organigrama de recursos humanos asignados al proyecto, que se puede ver en la Figura 3. Se creó una organización jerárquica orientada al proyecto a partir de una estructura matricial de una organización mayor. Se liberó, por tanto, a este equipo para que se dedicara por completo al proyecto, estructurado en unidades departamentales.

Figura 1: EDT del proyecto LUQUIRAR

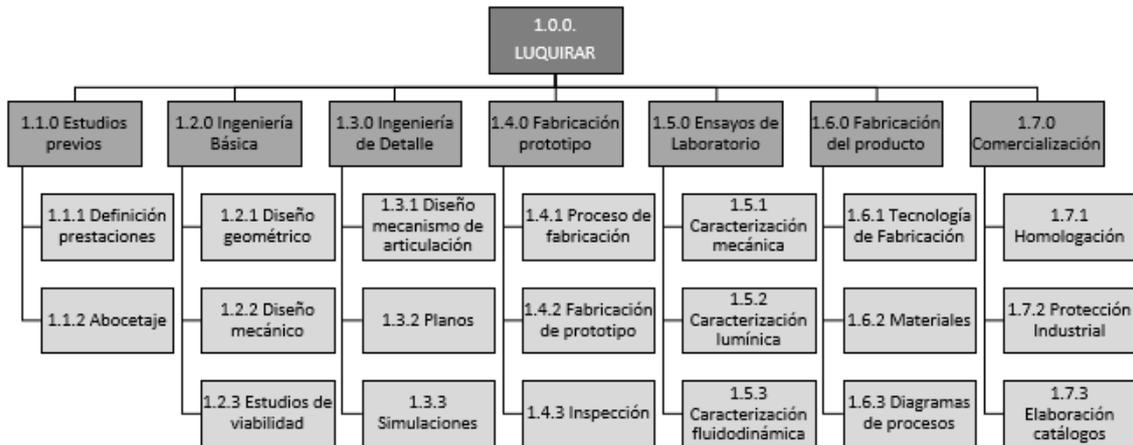


Figura 2: Especificaciones de cada WP

WP 05. Ensayos de Laboratorio

Descripción: Se realizarán ensayos de laboratorio para verificar de forma experimental los resultados obtenidos en las simulaciones de ordenador.

Objetivos relacionados: nº1, nº2, nº3 y nº4

Tareas: Tarea 05.01 Caracterización mecánica
Tarea 05.02 Caracterización lumínica
Tarea 05.03 Caracterización fluidodinámica

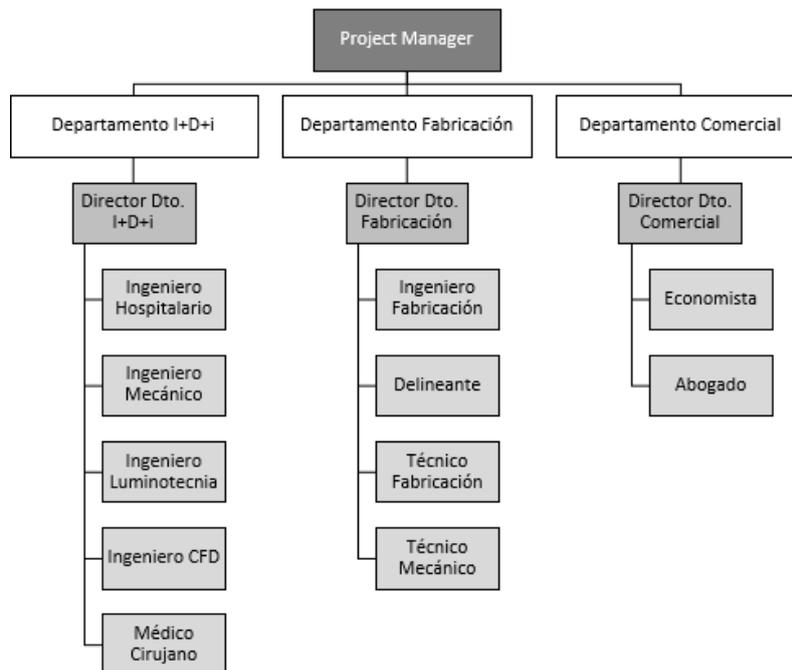
Responsable: Director dto. I+D+i

Participantes: Director dto. I+D+i, Ingeniero Mecánico, Ingeniero Luminotecnia e Ingeniero de CFD

Período de ejecución (mes): 5 – 7 **Lugar de trabajo:** Esc. de Ingenierías Industriales

Hitos y entregables:
H05.01 Validación del prototipo
E05.01 Informe con resultados de los ensayos

Figura 3: Estructura jerárquica orientada al proyecto



En la Figura 4 se muestra la matriz de asignación de responsabilidades elaborada, conocida como matriz RACI por las letras empleadas para asignar los roles dentro de la estructura organizativa. En ella se relacionan los WP (situados en las filas) con los recursos humanos del proyecto (en las columnas). La relación se indica con la letra R si es responsable de ejecución de dicho WP, A: responsable último del WP, C: persona a consultar en caso de duda, e I: persona que debe mantenerse informada. La identificación de personas asignadas a un determinado WP ya se ha hecho en la Figura 2, por lo no es necesario identificarlo aquí. Los huecos no significan, por tanto, que ese recurso no participe en un WP sino que no desempeña ninguno de los papeles indicados.

Figura 4: Matriz RACI

Paquete de trabajo	PM	Director Dto. I+D+i	Ingeniero Hospitalario	Ingeniero Mecánico	Ingeniero Luminotecnía	Ingeniero CFD	Médico Cirujano	Director Dto. Fabricación	Ingeniero Fabricación	Delineante	Técnico Fabricación	Técnico Mecánico	Director Dto. Comercial	Economista	Abogado
WP 01	I	A	R				C								
WP 02	I	A	C	R											
WP 03	I	A	C												
WP 04	I			C				A	R						
WP 05	I	A	C												
WP 06	I							R	A, C						
WP 07	I												A		C
WP 08	A	C						C					C		

Leyenda: R, Responsable de ejecución; A, Responsable último; C, Persona a consultar; I, Persona a informar.

Cabe destacar la singularidad de los presupuestos de este tipo de proyectos, que son completamente diferentes de los elaborados para fabricación o construcción. El presupuesto se descompone por capítulos, al igual que otro tipo de proyectos, pero también se suele mostrar descompuesto por paquetes de trabajo.

Los capítulos del presupuesto fueron:

- Personal, dividido en: personal investigador y resto de personal, debido a las bonificaciones fiscales por personal exclusivamente investigador.
- Adquisición de equipos e instrumental, en el que sólo se puede computar la amortización de dichos activos durante la duración de la investigación.
- Material fungible y resto de material de laboratorio.
- Colaboraciones externas, en las que se cuantifican las subcontratas de actividades no asumibles por la organización.
- Otros, donde se encuadran las licencias de software, adquisición de derechos de patentes, etc.

Por último, el plan de explotación de resultados contenía los apartados de: impacto bibliométrico, impacto social y/o económico, e impacto científico-técnico, así como las directrices para protección de los resultados.

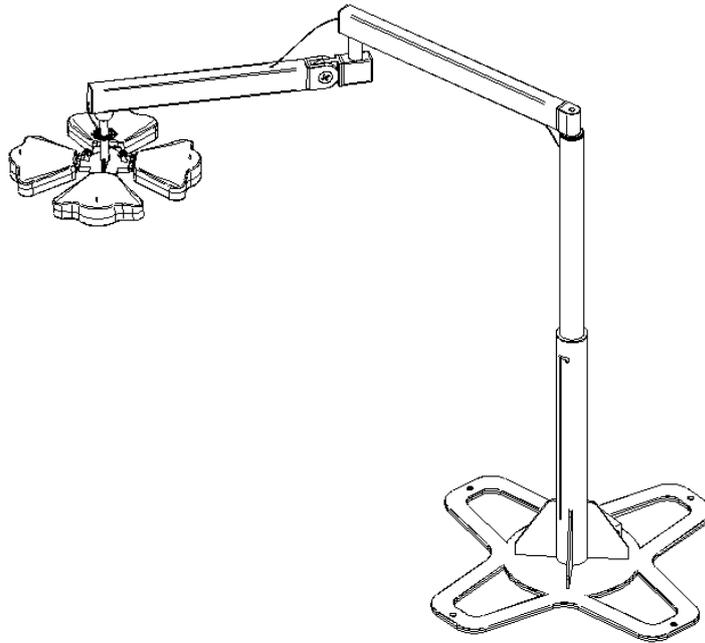
3.2 Proyecto técnico

En la realización del proyecto técnico para la definición del producto se llevó a cabo también el diseño y modelización planteado haciendo uso del software de diseño paramétrico. Como resultado se obtuvo una luminaria de pie para quirófanos que consta de un cabezal unido a la estructura principal de la misma mediante unos brazos articulados que permiten su movimiento orbital sobre la mesa de operaciones. Además, el cabezal está articulado y permite mover las alas del mismo, donde aloja las bombillas LED, para modular la apertura

de campo iluminado en función de la posición relativa del cabezal sobre la mesa de operaciones.

La luminaria está compuesta principalmente por las siguientes partes: estructura soporte articulada, cabezal articulado e instalación eléctrica y luminica. En la Figura 5 se muestra una imagen del producto terminado.

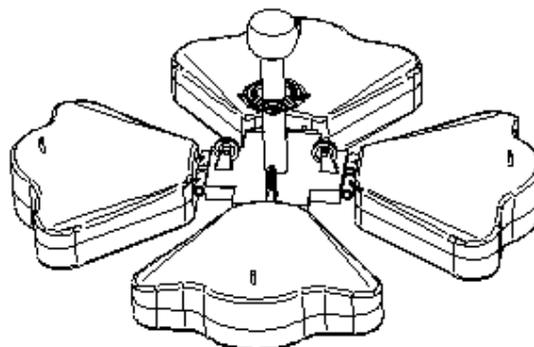
Figura 5: Producto diseñado, acrónimo: LUQUIRAR



En la Figura 6 se muestra el cabezal articulado diseñado. Como se puede ver, el cabezal está compuesto por cuatro alas unidas por una bisagra a la base del cabezal, que albergan las lámparas LED. Esta base está unida mediante una barra vertical a la estructura soporte. En su parte superior está la rótula que permite el giro del mismo.

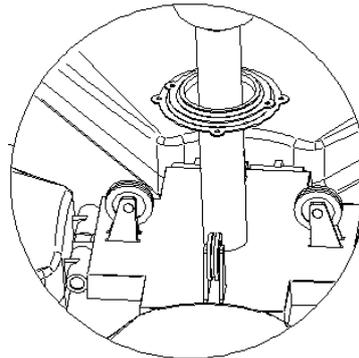
El movimiento de apertura-cierre de las alas es automático a partir de la posición del brazo horizontal que lo soporta. De esta manera, cuando el brazo horizontal está en su posición límite superior, el cabezal estará lejos del cuerpo del paciente y las alas estarán en su posición cerrada para focalizar el haz luminoso. De manera contraria, cuando el brazo está en su posición inferior, las alas estarán en su posición de apertura para abrir el campo iluminado.

Figura 6: Diseño del cabezal articulado



La apertura-cierre es ordenada por unos cables de acero arrollados en la unión que permite el movimiento arriba-debajo de la barra horizontal en cuestión. Los cables sería un impedimento para el giro del cabezal, puesto que se enrollarían con la barra vertical y no permitirían tirar de las alas a través de las guías instaladas en el borde de la base del cabeza. Por lo tanto, se adaptó el sistema GYRO para giro orbital de los manillares de bicicletas para el giro orbital del cabezal, y se muestra en la Figura 7. Este sistema independiza los cables que vienen desde el arrollamiento de la unión de los que van a las alas. Pero permite mantener el movimiento de tracción-relajación que tendrían si estuvieran unidos.

Figura 7: Detalle del sistema GYRO

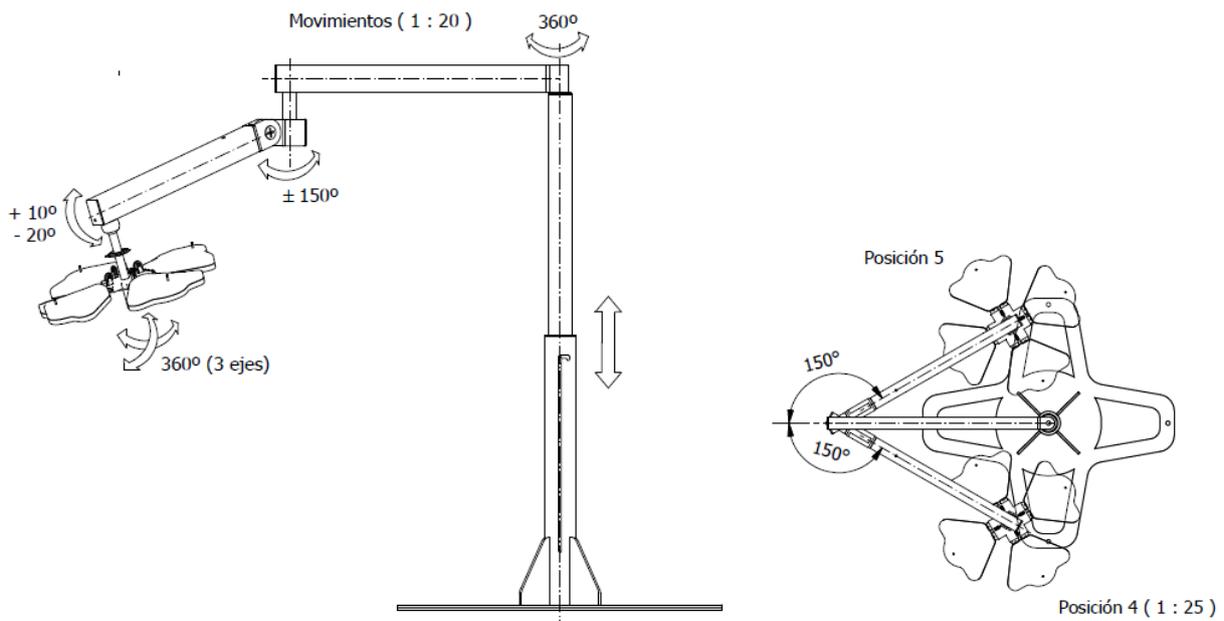


A continuación, se describen algunos de los anexos de la memoria, llevados a cabo para concretar el diseño del producto.

Estudio ergonómico

A partir de la definición de posiciones límite en el software de diseño paramétrico se obtuvieron los movimientos posibles del producto diseñado. Esto permite realizar una evaluación de la ergonomía del mismo, examinando la factibilidad de los movimientos del operador. En la Figura 8 se muestran dos vistas del estudio de posiciones límites realizado.

Figura 8: Estudio de posiciones límite del estudio ergonómico



Estudio de psicología visual

Tanto la sala de quirófano como su mobiliario y las propias herramientas empleadas en cirugía han sido tradicionalmente de color blanco. Esto favorece las operaciones de limpieza, identificando de forma visual la acumulación de suciedad, y transmite sensación de limpieza, esterilidad y asepsia. Además, empleado en mobiliario, este color transmitirá sensación de amplitud. Sensación muy necesaria para los espacios cerrados en los que se colocará.

Sin embargo, en los últimos años se está empleando el color verde para la vestimenta del personal de quirófano así como para determinados elementos auxiliares de los mismos. Esto es debido a dos razones: en primer lugar, se disminuye el contraste del color rojo de la sangre sobre las superficies blancas; y, en segundo lugar, mejora la percepción visual del médico a la hora de identificar patologías.

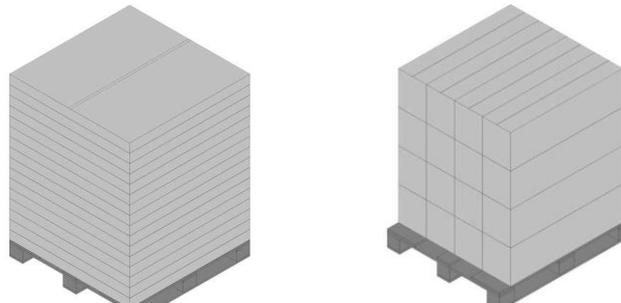
Estudio del envasado, empaquetado y transporte

Se realizó la definición de los envases en los que se dispondrán los diferentes elementos constituyentes de LUQUIRAR, así como el envase conjunto en el que se almacenará el producto.

A partir de los elementos constituyentes modelados se realizaron diferentes estudios para optimización de los envases. Se determinó la necesidad de utilizar dos envases, uno para la base y los rigidizadores, y otra para el resto de elementos. La primera será de 1.200 mm x 1.200 mm x 60 mm y la segunda de 1000 mm x 250 mm x 400 mm. El peso total del producto será de 63 kg.

A continuación, se evaluaron las opciones de empaquetado eligiendo aquella que minimizaba el volumen ocupado, lo que acarrea una disminución de los costes de transporte y almacenamiento. El resultado fue el que se muestra en la Figura 9. Resultando una capacidad de transporte por palet de 32 cajas tipo 1 y 16 cajas tipo 2. Se tuvo en cuenta la necesidad de dos palets de cajas tipo 2 por cada palet de cajas tipo 1.

Figura 9: Disposición de los envases sobre palet de dimensiones estándar



Por último, se realizó el estudio del transporte de los envases empaquetados definidos anteriormente. Se determinaron las siguientes capacidades de transporte en contenedores tipo *dry van*.

Para los contenedores de 20 pies se optimiza colocando:

- Cuatro palés de dimensiones especiales con cajas tipo 2 (que transportan la base y los rigidizadores de la luminaria) ocupando el largo del contenedor
- Cuatro palés tipo estándar cajas tipo 1 (con el resto de componentes de la luminaria) dispuestos del mismo modo en el otro lateral del contenedor.

En el caso de los contenedores de 40 pies, la optimización de su volumen de cargar será:

- Diez palés con cajas tipo 1, dispuestos longitudinalmente.
- Diez palés con cajas tipo 2, dispuestos también longitudinalmente.

Análisis estructural

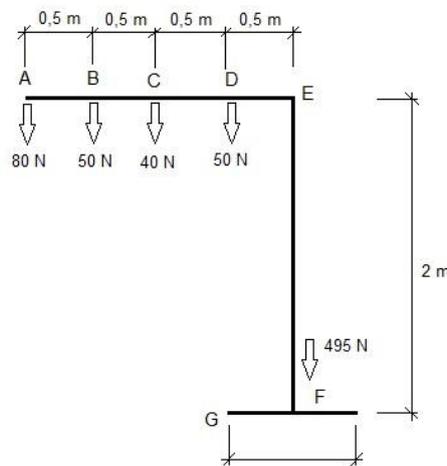
Se realizó un doble análisis estructural. Por un lado, se estudió la estabilidad global del producto en las condiciones de funcionamiento; por otro, se realizó un análisis mediante el método de los elementos finitos (MEF).

El análisis de estabilidad global se realizó aplicando las condiciones de equilibrio del sólido en el espacio. Estimando el peso de cada elemento y colocándolo en su posición se elaboró el diagrama del cuerpo aislado de la Figura 11. En la Ecuación (1) y Ecuación (2) se comprueba que el momento de vuelco (M_v), evaluado para el punto G, es menor que el momento estabilizador (M_e), lo que permite asegurar que el producto no volcará en condiciones de servicio.

$$M_v = 300 \text{ Nm} \quad (1)$$

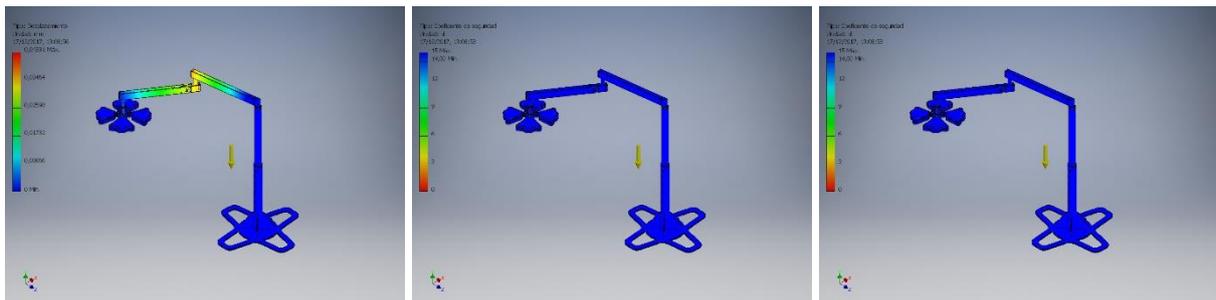
$$M_e = 330 \text{ Nm} \quad (2)$$

Figura 10: Diagrama del cuerpo aislado para análisis de estabilidad global



Los resultados del MEF, mostrados en la Figura 11, sirvieron para determinar la tensión de von Mises, los desplazamientos y la distribución del coeficiente de seguridad en el producto.

Figura 11: Resultados del análisis estructural mediante MEF



Análisis del ciclo de vida

El presente análisis se realizó con el complemento *Eco Materials Adviser* del software Autodesk Inventor Ltd. 2016. Se cuantificó el uso de energía y la huella de carbono generada de la fabricación y montaje del producto, así como un análisis de reciclabilidad del mismo al final de su vida útil.

En la Tabla 1 se muestran los resultados totales de estos parámetros que se generan al materializar una unidad del producto, así como los valores recuperables. Se puede destacar

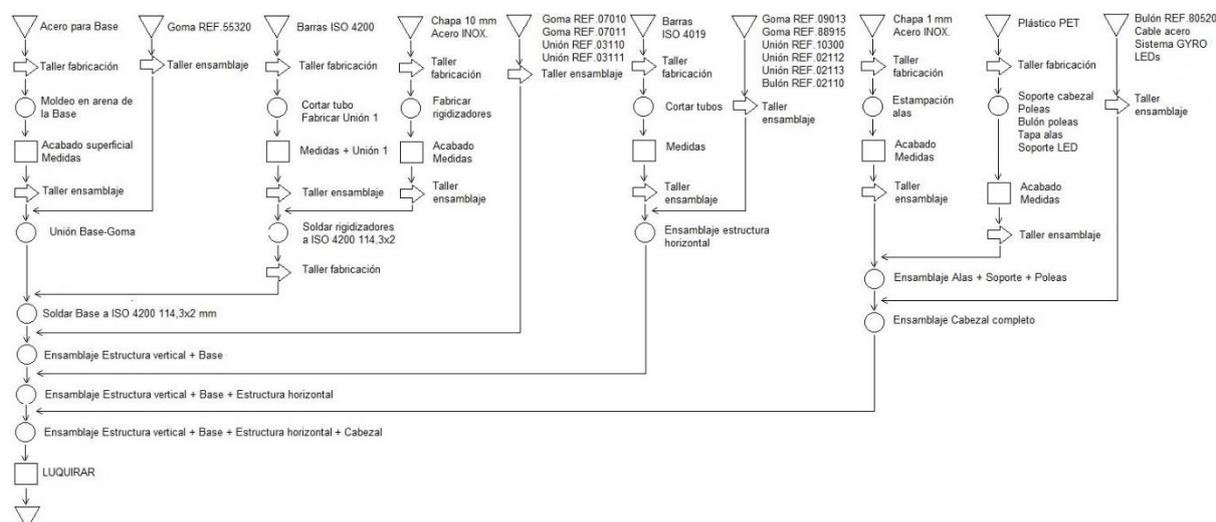
que el 67,9% de la energía invertida en el proceso es recuperable a través de la reutilización de los materiales empleados.

Tabla 1: Resultados del análisis del ciclo de vida

	Uso de energía	Energía recuperable	CO2 emitido	CO2 recuperable
Materiales	5.695,0 MJ	3.867,5 MJ	310,66 kg	198,64 kg
Montaje	93,14 MJ	-	3,83 kg	-
Total	5.788,14 MJ	3.867,5 MJ (67,91%)	314,49 kg	198,64 kg (63,95%)

Diagrama del proceso de fabricación

El diagrama de operaciones del proceso de fabricación se realizó empleando la simbología habitual. El triángulo significa la entrada y salida de input y output, respectivamente, al proceso, la flecha: desplazamiento, el círculo: operación sobre el input y el cuadrado: inspección del producto o material en curso.



4. Conclusiones

Se ha demostrado que es posible diseñar productos innovadores en ambientes de trabajos académicos mediante equipos multidisciplinares, mediante el método del caso. La metodología basada en simular el proceso completo por el que debe pasar una empresa o institución que desea llevar a cabo el diseño de un producto innovador participando en convocatorias para obtener financiación, pública o privada, en concurrencia competitiva es adecuada y genera motivación en el alumnado.

La utilización de software específico permite desarrollar adecuadamente y las estrategias propias del Project Management, organización, planeamiento, motivación y control de los recursos con la finalidad de alcanzar los objetivos propuestos para lograr el éxito del proyecto, permite optimizar el diseño de un producto.

5. Referencias

Project Management Institution. (2018). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos*. USA: Project Management Institute, Inc.

Sánchez-Barroso, G., García Sanz-Calcedo, J., & González, A. (2018). Influence of Air Pressure on Unidirectional Flow Operating Theatres: A Study Based on Computational

Fluid Dynamics. *ISCSIC '18 Proceedings of the 2nd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control*, (p. 51). Stockholm, Sweden. doi:10.1145/3284557.3284733

Sánchez-Barroso, G., García Sanz-Calcedo, J., & Marcos Romero, A. (2019). Influence of air velocity on indoor environmental quality in unidirectional flow operating theatres: a study based on Computational Fluid Dynamics. *E3S Web of Conferences*, 85, 02003. doi:10.1051/e3sconf/20198502003

Zoon, W., van der Heijden, M., Loomans, M., & Hensen, J. (2010). On the applicability of the laminar flow index when selecting surgical lighting. *Building and Environment*, 45(9), 1976-1983. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.011>