

OPTIMIZATION STUDY OF A CONSTRUCTION PROJECT OF A TUNA VESSEL THROUGH A PRODUCTION-ORIENTED DESIGN

Mascaraque-Ramírez, Carlos ¹; Para-González, Lorena ²; Moreno-Sánchez, David ¹

¹ Universidad Politécnica de Cartagena, ² Centro Universitario de la Defensa en la Academia General del Aire (MDE-UPCT)

Nowadays, shipbuilding new projects have been conditioned by a globalization framework that requires of an increasingly demanding term and cost competitiveness. Thereby, it is necessary a continuous study of improvement and optimization proposals, related to both the shipbuilding Project, as to the shipyards facilities. The present paper presents a number of enhancements focused on two main routes, such as the production-oriented design and the shipyard restructuring workshops and facilities.

It will be show how a correct standardization of the components in the design phase contributes to a cost reduction in their acquisition and an improvement in the personnel apprenticeship curve, in charge of their assembly and maintenance. Therefore, the term and labor costs are reduced.

Likewise, different lay-out techniques and several Quality Management production-applied methodologies will be analyzed, whose application will allow optimizing the workshops facilities, as well as the shipyard resources, in order to reduce process times and be able even to diversify new business lines.

Keywords: Optimization; standardization; production-oriented design; shipbuilding projects

ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UN BUQUE ATUNERO POR MEDIO DEL DISEÑO ORIENTADO A LA PRODUCCIÓN

En la actualidad, los proyectos de nueva construcción naval se ven condicionados por un marco de globalización que les exige una competitividad en el plazo y en el coste cada día más exigente. Por ello, es preciso el estudio continuo de propuestas de mejora y optimización, tanto del proyecto del buque, como de las instalaciones del astillero. El presente trabajo expone una serie de mejoras enfocadas a dos vías principales, como es el diseño orientado a la producción y la restructuración de los talleres e instalaciones del astillero.

Se mostrará cómo una correcta estandarización de los componentes en la fase de diseño aporta una reducción en los costes de adquisición de los mismos y una mejora en la curva de aprendizaje del personal encargado de su montaje y mantenimiento, reduciendo, por consiguiente, los plazos de entrega y con ello los costes pro mano de obra.

Asimismo, se analizarán técnicas de distribución en planta y otras metodologías de Gestión de la Calidad aplicadas a la producción, cuya aplicación permitirá optimizar las instalaciones de los talleres y recursos del astillero para reducir los tiempos de proceso e incluso poder diversificar nuevas líneas de negocio.

Palabras clave: Optimización; estandarización; diseño orientado a la producción; proyectos de construcción naval

1. Introducción

La industria de construcción naval de nuevas embarcaciones se encuentra en la actualidad en un momento de total globalización. En concreto, la construcción naval europea debe competir con la industria asiática que gestiona un 80% de la cartera de pedidos a nivel mundial. Por país-astillero, y según datos del Lloyds-Fairplay (Lloyds-Register, 2015), China se ha situado en la primera posición internacional, con el 34% de los contratos, dejando a Corea del Sur en segundo lugar con el 29.5% de los contratos y con casi la mitad de la cuota de contratos que consiguió en 2011; en tercera posición aparece Japón con un 18,4%. A notable distancia, se encuentra la contratación europea: un 8% del total mundial, que ha recuperado varias décimas de cuota de mercado, pese a reducir su volumen absoluto de contratación en último año.

El primer país por volumen de contratación de la UE ha sido Alemania (29%), seguido de Rumanía (19%). Por su parte, Italia y España tuvieron en 2012 la tercera y cuarta cuota de contratación de la UE, con una contratación del 11% y del 10% respectivamente.

Los astilleros chinos han centrado sus esfuerzos en ofrecer a los clientes precios bajos y ofertas de financiación irresistibles. A veces exigen tan sólo el 10% del coste a la firma de un contrato, dejando el otro 90% pendiente hasta después de la entrega. En este punto, la calidad, la eficiencia energética de las embarcaciones y el ajuste a las fechas de entrega son fundamentales y los astilleros chinos todavía tienen un déficit notorio en este aspecto, aunque su gran volumen de producción les hace tener una curva de aprendizaje muy pronunciada en el tiempo.

Por su parte, los astilleros europeos tienen grandes dificultades para competir con estos astilleros asiáticos, cuyos buques son más baratos gracias a menores costes, mayor producción y mano de obra barata, permitiendo que Corea del Sur, por ejemplo, pueda vender sus barcos a precios menores que los costes de producción europeos, no permitiendo así que los astilleros de Europa puedan ofertar reduciendo su margen de beneficios, siendo su única opción vender bajo pérdidas y depender de las ayudas nacionales o comunitarias. Con ello China y Corea del Sur absorben cada vez más pedidos y acaparan ya el 70% del mercado mundial. Los bajos precios que las empresas coreanas ofrecen a los armadores han permitido arrancar casi toda la cartera de pedidos a los países comunitarios. España es, junto con Alemania e Italia, uno de los países más afectados por este motivo.

En grandes cifras, entre 2009 y la actualidad, la construcción naval supone en España una capacidad de producción anual de más de 390.000 CGT (Toneladas Brutas Compensadas, que es una medida del arqueo bruto compensado, relacionado con las toneladas brutas mediante un coeficiente de compensación para cada tipo y tamaño de buque, que considera la complejidad constructiva en base a las horas de trabajo empleadas en su fabricación) y emplea directamente a unos 8.000 trabajadores (3.000 en los astilleros privados y 5.000 en los públicos). Además de generar otros 17.000 empleos en la industria auxiliar.

2. Objetivos

El presente trabajo de investigación propone diferentes medidas para poder reducir los plazos de entrega y los costes en el proyecto de construcción de un buque atunero, y conseguir que los astilleros españoles y europeos que se dedican a la fabricación de este tipo de embarcaciones, sean más competitivos en el marco internacional actual y puedan existir sin necesidad de las ayudas comunitarias.

Al no poder competir en las condiciones de financiación ni en los costes horarios de mano de obra, se ha de enfocar el estudio en la reducción de los plazos de entrega y en la reducción de los costes (Ahsan & Gunawan, 2010; De Snoo, Van Wezel & Jorna, 2011), como son los derivados de la adquisición de los materiales principales que conforman el buque, es decir, en las planchas de acero y en los equipos y componentes que se montarán a bordo.

3. Metodología y caso de estudio

En el presente estudio se ha tomado como referencia un buque atunero congelador proyectado para la pesca del atún por el sistema de cerco en caladeros situados en los Océanos Atlántico, Índico y Pacífico. Se caracteriza por ser un buque robusto pero ligero, con eficiencia energética y propulsiva. Dispone de 16 cubas autoportantes (no estructurales) para la congelación y conservación del atún. Las capturas de pescado se congelarán en las cubas de pescado por el sistema de *inmersión en salmuera*, conservándose posteriormente el atún congelado en seco en dichas cubas.

Las características principales del buque objeto de estudio se muestran en la tabla 1:

Tabla 1. Características principales del buque atunero congelador

Concepto	Valor
Eslora total	87,00 m
Eslora entre perpendiculares	74,40 m
Manga de trazado	14,20 m
Puntal a la cubierta superior	9,05 m
Puntal a la cubierta baja	6,55 m
Calado medio de trazado	6,30 m
Registro bruto estimado	2.570 cgt
Cubas de congelación en agua	1750 m ³
Capacidad de combustible (aprox.)	720 m ³
Capacidad de agua dulce (aprox.)	60 m ³
Capacidad de aceite lubricante (aprox.)	45 m ³
Peso Muerto	2230 t
Velocidad en pruebas a plena carga	17.5 Kn

Fuente: Elaboración propia (2016)

Para la mejora en los plazos de construcción y la reducción de los costes, se ha dividido el estudio en dos ramas: la primera se centrará en el diseño orientado a la producción y la segunda en la reestructuración de las instalaciones del astillero con el fin de optimizarlas para la construcción de este tipo de embarcación.

3.1 Diseño orientado a la producción

En esta etapa se persigue optimizar el proyecto en su fase de diseño (Eyres & Bruce, 2012), enfocándose en dos vertientes principales: la primera es la optimización del escantillado del barco, es decir, en el espesor de las planchas de acero que conforman la estructura principal del casco. La segunda es la estandarización de componentes y equipos del buque.

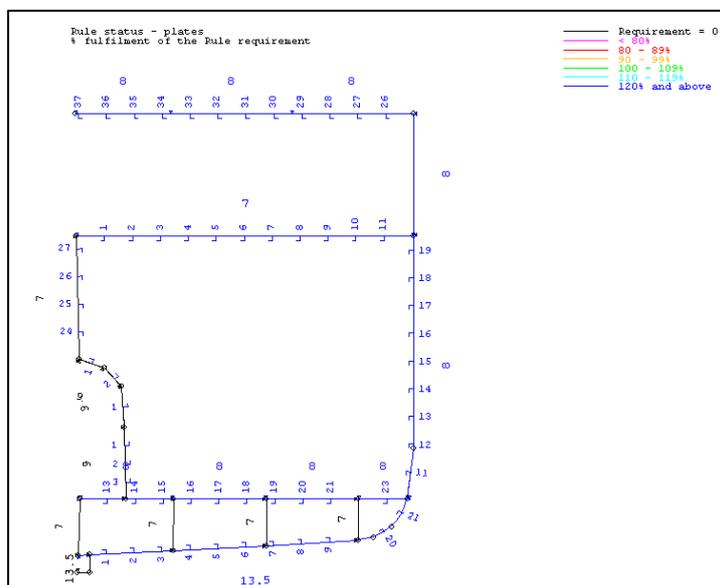
3.1.1 Optimización de la estructura del casco

La estructura de acero del casco del barco supone uno de los conceptos con mayor coste del proyecto. En este sentido, en los proyectos convencionales se siguen las normas clásicas de diseño definidas por las principales sociedades de clasificación (Alvariño-Castro, Azpíroz-Azpíroz & Meizoso-Fernández, 1997), mientras que, en la última década, la introducción de software más potente para el cálculo de los espesores de plancha ha llevado a la búsqueda de los escantillones mínimos que cumplan las normas de seguridad y sean suficientes para que la estructura sea estable en toda condición. En este trabajo de investigación se propone la optimización de las planchas, no solo buscando el mínimo espesor en cada una, sino minimizando el número total de espesores empleados en la obra.

Para los cálculos de escantillado se ha empleado la aplicación de cálculo de estructuras *Nauticus Hull*, de la sociedad de clasificación noruega DNV (Det Norske Veritas). *Nauticus Hull* es un software que permite evaluar la resistencia de las estructuras del buque, ofreciendo todas las herramientas necesarias para el diseño eficiente del casco y la verificación, de acuerdo con las reglas estructurales comunes para graneleros, petroleros, buques de pesca y otros tipos de buques (Det-Norske-Veritas, 2008).

En la figura 1, se pueden observar los espesores característicos de un atunero congelador convencional.

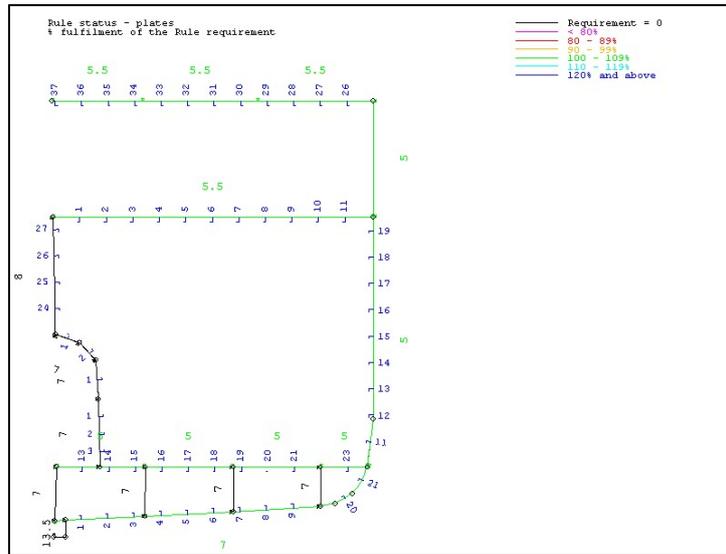
Figura 1: Situación inicial de escantillado del buque



Fuente: Elaboración propia mediante uso *Nauticus Hull* (2016)

Trabajando con este software es posible optimizar la estructura a unas condiciones ideales de mínimo espesor, resultando la estructura que se aprecia en la figura 2.

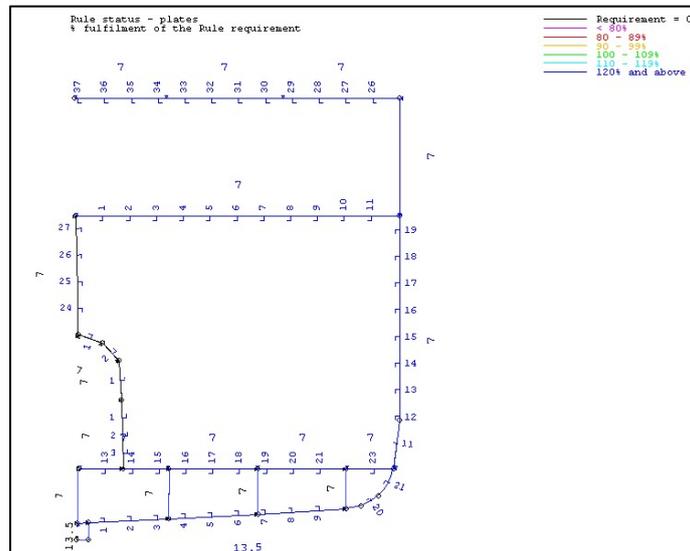
Figura 2: Situación de mínimo espesor para el escantillonado del buque



Fuente: Elaboración propia mediante uso Nauticus Hull (2016)

La situación que se muestra en la figura 2 cumple las condiciones estructurales sin margen de seguridad, por lo que ha de ser incrementada para cumplir con dichos márgenes. En esta fase se analiza, no solo el incremento de espesor para cumplir con los coeficientes de seguridad, sino también se persigue la estandarización de los espesores, reduciendo notablemente el catálogo de espesores empleados en la obra, llegando así a la situación que se expone en la figura 3.

Figura 3: Situación de estandarización de espesores para el escantillonado del buque



Fuente: Elaboración propia mediante uso Nauticus Hull (2016)

Este trabajo de estandarización logra reducir el número de espesores empleados, pasando de un total de 4 tipos de espesores (7, 8, 9 y 13,5mm) a 2 tipos de espesores (7mm y 13,5 mm.), cumpliendo en todo momento con los requisitos estructurales del buque.

Así, se ha realizado el mismo ejercicio con los perfiles empleados, consiguiendo reducir en una proporción similar el número de tipos de perfil empleados para los refuerzos longitudinales y transversales.

3.1.2 Estandarización de componentes y equipos

Al igual que ocurre con el casco del barco, los equipos que conformarán las instalaciones del buque se diseñan para minimizar el tamaño y requerimientos de los mismos, siendo en consecuencia los equipos elegidos los de menor coste que cumplan las condiciones de la instalación a la que vayan a servir (Eyres & Bruce, 2012). En este estudio se propone que no solo se optimicen los equipos en esta dirección, sino que además, se minimice el número de equipos diferentes que compondrán el proyecto y se reduzca lo máximo posible el número de proveedores con los que trabajemos.

En este apartado resulta fundamental centrarse en la reducción del número de proveedores, porque es un aspecto clave para lograr la reducción final de costes. Al estandarizar los componentes, lo más probable será aumentar las características de algunos de ellos, y por tanto, en una primera iteración, el coste total de los equipos puede parecer incrementado, pero al aumentar el volumen de compra a un mismo proveedor encontraremos dos vías inmediatas de ahorro: la primera consistirá en negociar unas mejores condiciones de adquisición de los equipos debido al mayor compromiso entre el proveedor y el astillero, y la segunda será la reducción de los costes internos de gestión con proveedores al tener que trabajar con un menor número de ellos (Kapurch, 2010).

La reducción de tipologías de materiales permitirá también una reducción de los stocks y minimizará los riesgos de retraso en la recepción de equipos. Por ejemplo, un mismo equipo podrá ser montado en un mayor número de instalaciones y, por lo tanto, si se retrasa la recepción de algunos equipos se podrá ir trabajando con los que se disponga en almacén. Si no aplicáramos la estandarización propuesta, un único equipo daría servicio a la instalación y si no dispusiéramos del mismo en almacén, el trabajo sufriría un retraso que podría impactar en la planificación (Clark, 2003).

La presente investigación se ha centrado en la estandarización de los equipos que se enumeran en la tabla 2, donde se muestra el coste y el número de tipos de equipos de la situación inicial y de la situación estandarizada.

Tabla 2. Variación en los equipos debida a la estandarización

Concepto	Coste inicial	Tipología	Coste estandarizado	Tipología
Motores	9.900 €	2	9.900 €	2
Grupos electrógenos	403.225 €	2	438.412 €	1
Generadores Diésel	5.718 €	1	5.718 €	1
Electrobombas	24.469 €	5	24.684 €	4
Bombas	93.781 €	8	95.537 €	6
Electro ventiladores	13.719 €	5	15.278 €	4
Compresores	8.830 €	2	8.830 €	2
Purificador de Combustible	25.400 €	1	25.400 €	1
Iluminación	3.484 €	6	3.126 €	5
TOTAL	588.526 €	32	626.885 €	26

Fuente: Elaboración propia (2016)

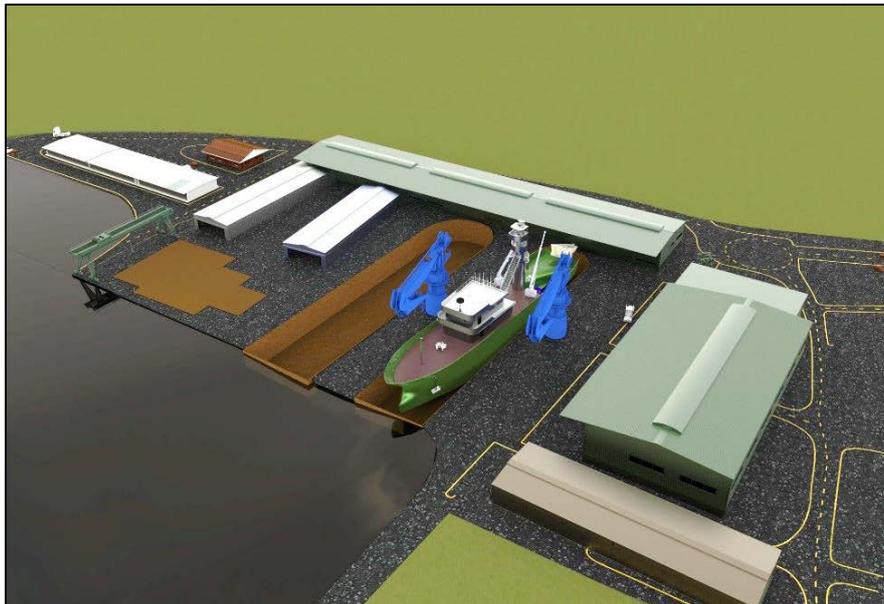
Se puede ver que los resultados iniciales muestran un incremento del 6,5% del coste inicial de adquisición, sin tener en cuenta las mejoras en las negociaciones y la disminución en los costes de gestión de compras. Por otro lado, se obtiene un descenso de 32 a 26 tipologías de materiales, y por tanto, una reducción cercana a un 20% en los tipos de equipos a comprar y montar.

3.2 Restructuración de talleres e instalaciones del astillero

En paralelo a la optimización del proyecto de diseño del buque se ha trabajado en la restructuración de las instalaciones típicas de un astillero de nueva construcción de buques atuneros. La presente investigación se ha enfocado en la mejora del proceso productivo, en la reducción de movimientos improductivos de los productos en curso, en la disposición en planta de los talleres para adecuarla a la fabricación de grandes bloques, y en la minimización del tiempo de uso de las gradas de construcción para cada buque (Project-Management-Institute, 2004; Eyres & Bruce, 2012).

La figura 4 muestra la disposición característica de un astillero de construcción con 2 gradas de armamento, con el buque de estudio en la grada 1.

Figura 4: Vista en 3D de la distribución del astillero



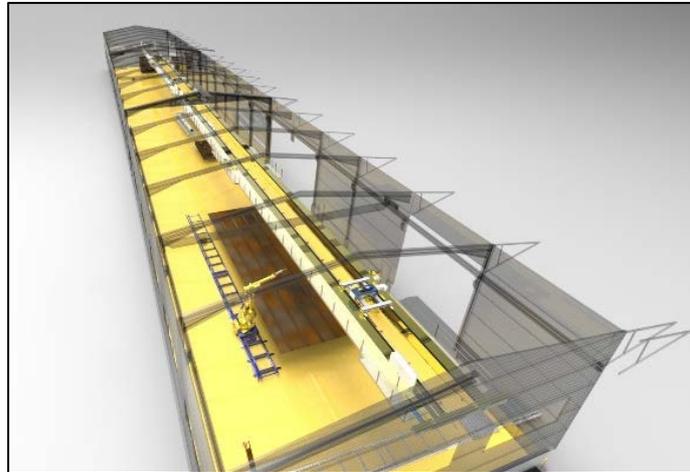
Fuente: Elaboración propia (2016)

En esta figura se puede apreciar la distribución en forma de U empleada, iniciando en el parque de recepción de plancha, continuando con los talleres de conformado de bloques (figura 5), situándose a la derecha el taller de armamento de grandes bloques (figura 6), finalizando en la zona central con las 2 gradas de construcción.

La distribución clásica de este tipo de astillero está basada en gremios, separando la zona de soldadura de bloques, la de fabricación de tubería, la construcción de estructuras menores, etc. En este estudio se han empleado las técnicas de un modelo de *fabricación esbelta*, conocido como *Lean Manufacturing*, ofreciendo así una alternativa más competitiva. El flujo continuo y tenso de los productos intermedios por los diferentes talleres permite una reducción inmediata de los costes de stocks intermedios y de los plazos de fabricación.

Dentro de los talleres se emplea una distribución lineal, donde el producto va aumentando su grado de construcción hasta que llega a la siguiente etapa del proceso. En la figura 5 se muestra el ejemplo del taller de conformado de bloques.

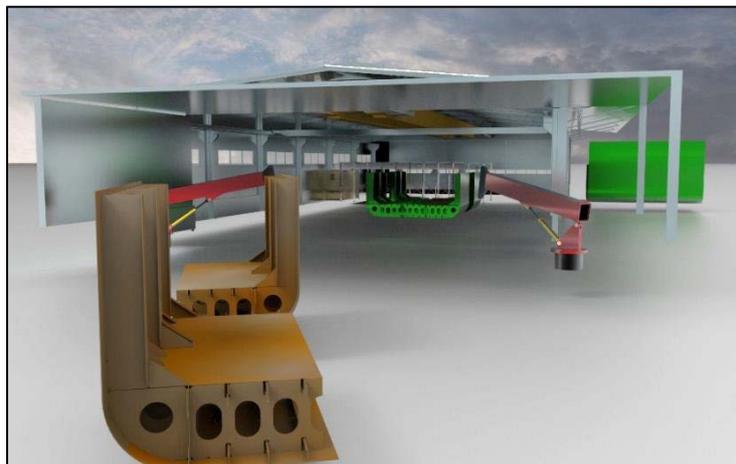
Figura 5: Taller de conformado de bloques



Fuente: Elaboración propia (2016)

El diseño y la fabricación basada en el concepto de grandes bloques permiten la construcción de los mismos en los talleres, como se muestra en la figura 6. Al trabajar en los talleres, el trabajo se realiza en mejores condiciones (Eyres & Bruce, 2012), lo que se traduce en un aumento de la calidad de los trabajos, una disminución en los tiempos de construcción y en los defectos y, consecuentemente, una reducción en los reprocesados.

Figura 6: Taller de armamento de grandes bloques



Fuente: Elaboración propia (2016)

4. Resultados

El análisis de todos los datos obtenidos en los apartados anteriores permite enfocar los resultados a los objetivos que persigue esta investigación, separándolos en dos categorías: los obtenidos por el diseño orientado a la producción y los resultantes de la restructuración de las instalaciones.

4.1 Resultados obtenidos en el diseño

La fase de rediseño del casco del barco se ha concluido con una estandarización de los espesores de las planchas, reduciendo la necesidad de 4 tipos de espesores a únicamente 2 tipos de espesores. Además, se ha podido optimizar el casco reduciendo el peso total de acero necesario y, por ende, su coste. Estos resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Comparativa de peso y coste en el proceso de optimización del casco

	Situación inicial	Situación propuesta	Diferencia	Diferencia %
Metros cúbicos de acero	97 m ³	89 m ³	8 m ³	8%
Peso total del acero	764 t	699 t	65 t	9%
Coste total del acero	305 K€	279 K€	26 K€	9%

Fuente: Elaboración propia (2016)

Se aprecia una disminución del 9% del peso y coste del acero, lo que representa una reducción directa en la compra de acero y un descenso del coste de explotación del barco al tener este un menor peso.

Respecto a la estandarización de los componentes, la tabla 4 recoge las principales ventajas e inconvenientes detectados al ejecutar la estandarización propuesta.

Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de la estandarización de los equipos del buque.

VENTAJAS	INCONVENIENTES
<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de un 20% en el número de tipologías de equipos a emplear - Reducción equiparable en el número de proveedores a contratar. Esto produce una disminución de los gastos de gestión de compras del astillero - Posibilidad de mejorar las condiciones de compra de los equipos con el suministrador, al aumentar el volumen de adquisición con un mismo suministrador - Mejora en la curva de aprendizaje de los operarios destinados al montaje de los equipos. - Mejora en la curva de aprendizaje de los marineros que operarán el buque durante su ciclo de vida. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor precio unitario en los equipos a emplear - Incremento inicial de un 6,5% en el coste de adquisición de los equipos

Fuente: Elaboración propia (2016)

Puede finalmente determinarse que las ventajas resultan ser mayores que los inconvenientes. Concretamente, analizando los inconvenientes principales, el incremento inicial del coste en un 6,5% se verá reducido en las negociaciones con los suministradores, ya que en estas se pretenderá conseguir una disminución de los costes de adquisición por un mayor volumen de compra al mismo suministrador y por la reducción en los costes de gestión de compras, al tratar con un menor número de suministradores.

El coste mayor unitario puede ser un inconveniente, si es necesario comprar puntualmente elementos sueltos para poder sustituir algún equipo a lo largo de la construcción o del ciclo de vida. No obstante, la ventaja de reducir las horas de montaje debido a la mayor especialización de los operarios con los equipos a montar, hace que este inconveniente sea contrarrestado. Esto mismo es extrapolable al ciclo de vida, lo cual es una ventaja para el naviero que explote el buque.

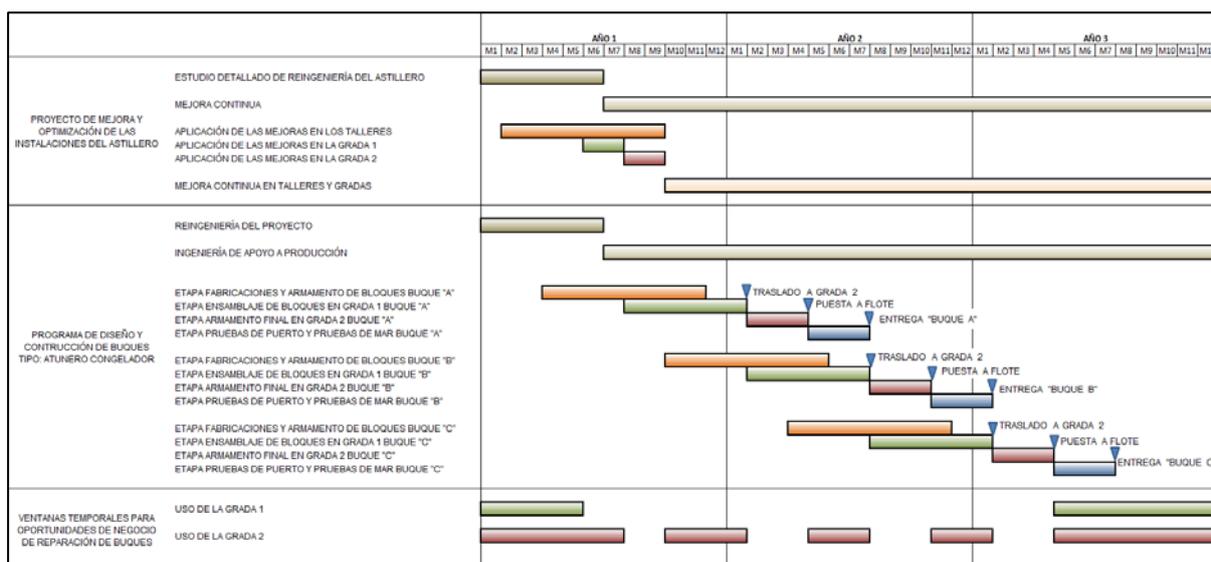
4.2 Resultados obtenidos en la reestructuración de las instalaciones

El estudio realizado para la reestructuración de las instalaciones del astillero produce tres resultados positivos claros a la empresa. El primero es la reducción de los tiempos de fabricación de cada buque, al optimizar los talleres y emplear una mejor distribución en planta en cada uno de ellos. Asimismo, empleando una distribución en U del astillero se reduce el tiempo de fabricación de cada producto intermedio y se ven reducidos los tiempos empleados en los movimientos de material.

La segunda ventaja es la disminución del tiempo de construcción en grada. Este tiempo es más costoso y de mayor dificultad técnica que la construcción en taller (Alvariño-Castro, Azpíroz-Azpíroz & Meizoso-Fernández, 1997; Eyres & Bruce, 2012), por lo que todo trabajo realizado en taller será más barato que el realizado en grada.

Por último, y como tercera ventaja, al reducir los tiempos de uso de las gradas se generan unas ventanas de oportunidad de uso de las mismas para otras líneas de negocio del astillero. En la figura 7 se muestra una planificación orientativa para la construcción de una serie de 3 buques atuneros, donde se puede apreciar la aparición de 3 ventanas de oportunidad en el uso de una de las gradas, las cuales se podrían emplear para, por ejemplo, la reparación de buques.

Figura 7: Planificación de la construcción de una serie de 3 buques



Fuente: Elaboración propia (2016)

5. Conclusiones

En esta investigación se emplean y desarrollan los conceptos de diseño orientado a la producción y estandarización para lograr una mejora en la competitividad de la construcción naval europea en el mercado internacional, estando enfocada dicha mejora al proyecto de nueva construcción de buques tipo atunero congelador.

Para ello, se han utilizado los conceptos de mejora de la producción por medio del *Lean Manufacturing* y de la distribución en planta en forma de U, con el fin de optimizar las instalaciones de los astilleros y orientarlas a la reducción de plazos y costes. Asimismo, se han identificado oportunidades de diversificación en las líneas de negocio producidas por la disminución en el uso de las gradas de construcción, debido a un mayor porcentaje de montaje de las nuevas embarcaciones en los talleres y a la fabricación en grandes módulos.

Los resultados obtenidos muestran una mejora relevante en los costes directos de construcción, concretamente en lo referente a la adquisición de acero y equipos del buque. Además, conjuntamente con la restructuración de las instalaciones, se logra una reducción en los plazos de ejecución, que también se traslada a una disminución de los costes al reducirse los tiempos de entrega y las horas y servicios auxiliares necesarios para la producción.

Referencias

- Ahsan, K., & Gunawan, I. (2010). Analysis of cost and schedule performance of international development projects. *International Journal of Project Management*, 28(1), 68-78.
- Alvariño-Castro, R., Azpíroz-Azpíroz, J. J., & Meizoso-Fernández, M. (1997). *El proyecto básico del buque mercante*. Madrid (Spain): Fondo Editorial de Ingeniería Naval.
- Clark, A. R. (2003). Optimization approximations for capacity constrained material requirements planning. *International Journal of Production Economics*, 84(2), 115-131.
- De Snoo, C., Van Wezel, W., & Jorna, R. J. (2011). An empirical investigation of scheduling performance criteria. *Journal of Operations Management*, 29(3), 181-193.
- Det-Norske-Veritas. (2008). *Nauticus Hull - User Manual*. Høvik (Norway): DET NORSKE VERITAS.
- Eyres, D. J., & Bruce, G. J. (2012). *Ship Construction*. Butterworth-Heinemann.
- Kapurch, S. J. (2010). *NASA Systems Engineering Handbook*. Washington, D.C. (USA): DIANE Publishing Company.
- Lloyds-Register. (2015). *IHS Fairplay Register of Ships 2015-2016*. Redhill (United Kingdom): IHS Global Incorporated.
- Project-Management-Institute. (2004). *A Guide To The Project Management Body Of Knowledge (PMBOK Guides)*. Project Management Institute.