

TÍTULO: El Astillero 4.0: Modelado y Simulación del Astillero de Navantia-Ferrol

AUTORES

Marcos Rouco Couzo
Marta Quiroga Pazos
Mar Cebral Fernández

Rafael Morgade Abeal
Alejandro García del Valle
Diego Crespo Pereira

RESUMEN

Debido a los grandes cambios sufridos en las últimas décadas en la industria en general y a la enorme competitividad existente hoy en día, es fundamental para cualquier empresa ofrecer sus productos al menor coste posible, con un alto grado de calidad y en un menor plazo de fabricación que sus competidores. El proceso de construcción naval es uno de los más complejos, debido al gran número y diversidad de elementos que están implicados en la fabricación de un buque.

El objetivo de este trabajo, englobado dentro de la Unidad Mixta de Investigación Astillero 4.0, es el de obtener a través del modelado y simulación de eventos discretos, un modelo de simulación del proceso productivo del astillero de Navantia Ferrol del que se puedan extraer unos resultados que serán de gran valor para la fabricación del buque, desde la fase de presupuestación hasta la fase de entrega al cliente final. El modelo de simulación propuesto permite la optimización de procesos, lo que conllevará a una mejora de la productividad y de la planificación, y una reducción, como consecuencia, del coste total del producto fabricado.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	3
2	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	4
3	DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN	5
3.1	Datos del modelo	6
3.2	Bloques y Sub-bloques	6
3.3	Proceso de desagregación	7
3.4	Proceso de simulación	7
4	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	8
4.1	Análisis de una planificación mejorada	9
4.2	Análisis detallado del Taller de Elaboración y Previas	11
4.3	Análisis de la máxima capacidad de la línea de paneles planos	12
5	CONCLUSIONES	13

1 INTRODUCCIÓN

La construcción naval es uno de los procesos de fabricación existentes más complejos, debido a la gran diversidad de elementos que intervienen en el proceso productivo. Este sector, donde la producción seriada es prácticamente inexistente, se caracteriza por ser una industria que proporciona productos únicos, con unidades de alto valor añadido y largos periodos de construcción.

El mercado de la construcción naval se caracteriza por la existencia de una intensa competencia. En un entorno donde los precios han disminuido en parte debido a un exceso de capacidad, la industria se enfrenta a una feroz competencia internacional, lo que obliga a los constructores a aumentar su rendimiento con el objetivo de adaptar su proceso en diferentes escenarios técnicos y de gestión (Lamb et al. 2006). Esto es particularmente difícil en el caso de la construcción de fragatas, donde debido a su naturaleza única, las fases de oferta, planificación y programación se vuelven extremadamente complejas ya que no existen datos históricos fiables para el desarrollo exitoso de las primeras fases antes de la construcción del buque (Duclos, Vokurka, and Lummus 2003). Por lo tanto, una planificación y programación adecuadas son primordiales para el éxito de los diferentes proyectos. Por un lado, la coordinación de los diferentes talleres involucrados en el proceso de construcción del buque tiene un impacto significativo en el rendimiento y la calidad. De hecho, este es un factor clave para la competitividad de los constructores europeos, y, por otro lado, los hitos acordados con el cliente en la firma del contrato (quilla, botadura y entrega) deben ser cumplidos. Estos hitos son utilizados por los planificadores de astilleros como base para la planificación del montaje de los bloques en Grada (Meijer, Pruyn, and Klooster 2009). El montaje de bloques en Grada suele ser el cuello de botella en la mayoría de los astilleros europeos (Krause et al. 2004) marcando la capacidad de producción de los talleres de fabricación. En definitiva, la secuencia de fabricación de los bloques debe planificarse con precisión para garantizar su correcta llegada a la Grada, teniendo en cuenta no sólo las restricciones de secuencia de ensamblaje, sino también los tiempos de fabricación de cada bloque, así como la disponibilidad de recursos a lo largo de todo el proceso.

A través de este estudio se desarrolla un modelo de simulación de eventos discretos (elaborado con el software ExtendSim) del proceso de fabricación de una fragata, a través del cual se minimizarían las posibles incertidumbres que pudiesen surgir.

Para proceder a la validación del modelo de simulación, se procede al estudio de tres escenarios reales de producción. El objetivo principal de este trabajo es la obtención de un modelo de simulación multinivel del proceso de fabricación de un buque para ser empleado no sólo en las primeras etapas del proyecto, cuando las especificaciones aún no están detalladas, sino también en las etapas posteriores, cuando ya el diseño está definido y los datos de fabricación necesarios ya están disponibles.

Debido a la naturaleza del proceso de construcción naval, la simulación no ha sido ampliamente utilizada dentro de la industria (Shin, Kwon y Ryu 2008). El gran número de operaciones necesarias para producir los bloques de un buque unidas a la necesidad de sincronizar múltiples flujos de trabajo y numerosos recursos hacen que la gestión de dicho sistema de producción sea muy difícil. Teniendo en cuenta todas estas particularidades, la simulación representa una herramienta extremadamente poderosa para el proceso de toma de decisiones que resulta ser útil para probar y evaluar diferentes escenarios y para planificar eficientemente futuras inversiones potenciales y la asignación de recursos, reduciendo drásticamente los riesgos de tomar decisiones equivocadas. El NRC (1998) identificó la simulación como una de las tecnologías de avance más importantes que acelerarían el progreso para abordar los grandes retos en la fabricación en el 2020, anticipando que la simulación permitiría tomar decisiones basadas en escenarios alternativos.

En los últimos años, se han investigado diferentes tipos de enfoques de modelado de simulación en diversos intentos de abordar las peculiaridades de la construcción naval. Entre los primeros ejemplos de simulación se encuentran Ginsberg, Markowitz, and Olfadather (1965) y el proyecto de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, RAND. Posteriormente, varias investigaciones han contribuido al desarrollo de la simulación en la industria de ingeniería civil (por ejemplo, ver Burnett et al. 2008). En la construcción naval, Kiran et al. (2001) utilizaron la simulación para evaluar los programas de producción, la utilización de los recursos, el flujo y la capacidad del material y el trabajo.

De forma paralela, los estudios más notables sobre el problema de la programación espacial en astilleros se realizaron en el contexto del proyecto DAS (Jae Kyu Lee et al. 1995). Cho et al. (2001) y Park et al. (2002) presentaron una serie de algoritmos para optimizar la utilización del espacio de trabajo para el proceso de pintura de bloques. Años más tarde, Zheng et al. (2011) desarrolló un algoritmo voraz con el objetivo de minimizar el intervalo de fabricación (makespan) centrándose en estrategias espaciales de programación. Zhuo, Chua Kim Huat, and Wee (2012) desarrollaron un método de planificación híbrido que utilizó la simulación para realizar una programación anticipada. Además, otros trabajos se han centrado en la planificación local de partes específicas del proceso de ensamblaje de secciones (Seo et al., 2007). Rose and Coenen (2016) habían estado trabajando con éxito con algoritmos genéticos para generar automáticamente esquemas de construcción de secciones. Algunos autores han desarrollado recientemente modelos híbridos con el objetivo de mejorar la productividad de los talleres de astilleros como Caprace et al. (2011) y Bair et al. (2013).

En la última década han surgido nuevas iniciativas para acelerar el desarrollo de la simulación en la industria de la construcción naval, como el grupo SimCoMar (Simulación de Cooperación en Industrias Marítimas) y SIMOFIT (Simulación de Equipamiento en Construcción Naval e Ingeniería Civil) (Steinhauer 2011). Además, muchos astilleros han comenzado a trabajar con modelos de simulación de eventos discretos como en Flensburger Schiffbau-Gesellschaft, Meyer y Aker Ostsee en Alemania y muchos astilleros asiáticos. Hoy en día, en España, a diferencia de otros ámbitos como el aeroespacial y el automovilístico, donde está fuertemente consolidado, el uso de la simulación en la industria de la construcción naval aún no se ha explorado.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

La industria naval se caracteriza, a diferencia de lo que sucede en otras industrias como por ejemplo la automovilística donde la producción es seriada, por realizar una producción a medida, donde cada buque tiene un diseño diferente y unas características determinadas en función de los requerimientos y necesidades de cada cliente. Por lo tanto, es importante entender la existencia de procesos de fabricación significativamente diferentes de los que hay en otros sectores.

A continuación, se muestra un esquema de los procesos de fabricación llevados a cabo en el astillero objeto de estudio, Figura 1:

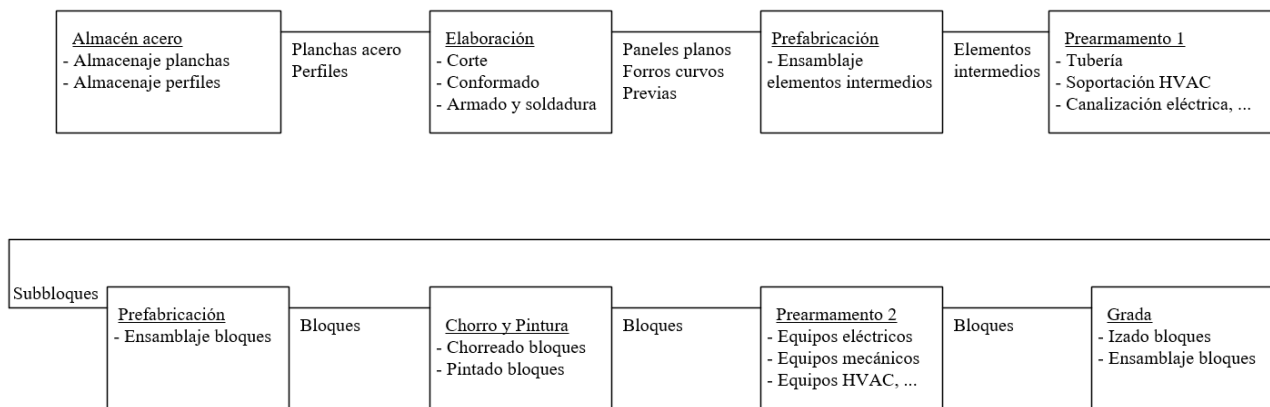


Figura 1: Proceso de fabricación en el astillero.

El proceso de fabricación del buque comienza en el taller de Elaboración y Previas, donde se cortan las chapas y los perfiles que constituirán las previas, paneles, forros y conjuntos que con posterioridad conformarán los subbloques en la etapa de prefabricación (taller de Prefabricación), una vez estas dos primeras etapas están completas se inicia la fase de prearmamento de los subbloques (taller de Prearmamento1) donde serán montadas las tuberías, HVAC, canalizaciones eléctricas...etc. Cuando los subbloques alcanzan el grado de prearmamento adecuado se procede a la unión de subbloques que dará lugar a los bloques finales y estos se pasarán a chorro y pintura (Cabinas de Chorro y Pintura) de donde se dirigirán a prearmamento de nuevo (taller de Prearmamento 2) para terminar de completar el montaje de equipos eléctricos, mecánicos, equipos de HVAC, tuberías...etc. Finalmente, una vez se ha concluido la finalización del armamento de los bloques estos serán trasladados a Grada donde serán montados en orden siguiendo la estrategia constructiva marcada.

3 DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

La naturaleza innovadora del modelo de simulación radica en el hecho de que puede usarse tanto en un nivel agregado como en un nivel detallado.

A nivel agregado, resulta especialmente útil en las etapas iniciales del proyecto, como la fase de licitación, cuando sólo se ha desarrollado la ingeniería básica de los barcos. El modelo se utiliza para desarrollar un plan agregado inicial que asegure el cumplimiento de los hitos impuestos por el cliente a partir de datos históricos de construcciones previas equivalentes llevadas a cabo en el astillero.

A un nivel más específico, cuando se ha desarrollado la ingeniería de detalle y se dispone de datos realistas y precisos sobre el producto, el modelo resulta ser eficaz para examinar aspectos específicos del proceso de construcción y para analizar los talleres en mayor detalle. El modelo es apropiado, entre otras cosas, para detectar ineficiencias en talleres particulares y después actuar sobre ellos, probar el impacto que las diferentes modificaciones de un taller tendrían localmente, así como sobre el proceso global o para desarrollar un plan detallado de entrega del producto a tiempo para el próximo taller. Todo ello garantizando una carga más equilibrada en cuanto a la utilización de los recursos propios del astillero. Esta tarea requiere de una gran definición de los atributos de entrada y las variables que caracterizarán tanto los procesos realizados en el astillero como cada uno de los componentes (o productos) que conformarán el buque.

3.1 Datos del modelo

Todo el proceso ha sido modelado utilizando el software de Simulación de Eventos Discretos ExtendSim. El alto nivel de resolución que requiere un proceso de producción tan complejo hace de ExtendSim una excelente solución que cumple perfectamente con los requisitos del modelo. Un aspecto crítico que se ha tomado en consideración al seleccionar este software ha sido la facilidad de integración con el software que se utiliza en el astillero, como Microsoft Excel y SAP, de este modo se consigue facilitar el proceso de entrada de datos y la comprensión de los resultados de salida del modelo por parte tanto de los ingenieros de planificación como de los jefes de taller. Se han realizado grandes esfuerzos en la recopilación y el análisis de datos con el fin de lograr una parametrización muy precisa de los componentes del buque.

3.2 Bloques y Sub-bloques

La fragata simulada se compone de 50 sub-bloques que se unen a su vez en 25 bloques. Con el fin de representar la carga de trabajo completa de la fragata, los subbloques se han desglosado en base a sus características estructurales, resultando en 5 tipologías, para cada una de las cuales se ha seleccionado un subbloque por ser el más representativo de la tipología. Todos los subbloques seleccionados han sido analizados minuciosamente. Los principales atributos que caracterizan estos 5 subbloques se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1: Principales atributos de los subbloques

Tipología	Nº Previas	Nº Varengas
Peso	Nº Baos	Nº Chapas (previas)
Nº Paneles planos	Nº Esloras	Nº Perfiles (previas)
Nº Paneles curvos	Nº Bulárcamas	Nº Chapas (paneles)
Nº Perfiles longitudinales	Nº Mamparos	Nº Perfiles (paneles)

Una vez que estos subbloques están completamente definidos, los restantes atributos son generados automáticamente por una macro VBA, distribuyendo los elementos proporcionalmente en función de sus pesos. Se estudian, además, otros atributos más específicos que son útiles para definir el resto de los subbloques individualmente, como el número de tuberías, dimensiones de subbloques, etc.

A continuación, se añade la secuencia de entrada de bloques. Un archivo Excel contiene información de la programación de corte para cada subbloque, es decir, la secuencia de entrada de las chapas de acero y los perfiles en el primer taller. Cuanto más fiables sean estos datos, más precisos serán los resultados en esta primera etapa de planificación. Un aspecto importante para tener en cuenta es la restricción de llegada de los bloques a la grada. Esta secuencia, predefinida por la estrategia constructiva del buque en una etapa inicial del proyecto, actúa como una variable fija en el modelo. Sólo hay una secuencia de posicionamiento posible para los bloques debido a restricciones estructurales y de ingeniería. Por lo tanto, cuando un bloque alcanza la última etapa (ubicación en la grada), se producirá un retraso si el bloque anterior no se encuentra todavía colocado.

3.3 Proceso de desagregación

Una vez que los atributos de los subbloques principales se definen y los bloques se cargan en el modelo, se produce un proceso de desagregación. Los subbloques se subdividen automáticamente en sus componentes estructurales, generando un desglose detallado de cada elemento que compone el buque. Durante este proceso de desagregación, se añaden más propiedades a los elementos. La resolución del modelo permite simular desde las partes más pequeñas (chapas de acero o perfiles) hasta llegar a enormes bloques. En la etapa a nivel agregado, la descomposición en sus elementos proviene del análisis de un buque equivalente anterior y será reemplazada por datos reales de construcción actual una vez que estén disponibles y con la ingeniería más avanzada.

Se ha realizado un exhaustivo análisis de los elementos del barco además de todos los procesos de construcción, con el fin de definir adecuadamente los atributos y las ratios empleadas a lo largo de todas las fases en el proceso de construcción. En la Tabla 2 se pueden comprobar las principales ratios utilizadas:

Tabla 2: Principales ratios empleadas

Longitud corte de chapas
Longitud cordones soldadura
Espesor chapas
Tamaño lotes para transporte
Dimensiones perfiles
Dimensiones chapas acero

Esta parte del análisis ha supuesto grandes dificultades debido al número y la diversidad de los elementos del buque analizados. Como ejemplo, en el caso de las longitudes de soldadura de las chapas, se han analizado más de 1.200 planos de ingeniería con el fin de lograr un alto grado en el ajuste de las distribuciones estadísticas.

3.4 Proceso de simulación

En los primeros talleres, durante la simulación, los componentes de cada bloque se procesan y ensamblan según las órdenes de fabricación. Luego, los bloques / subbloques pasan por los talleres sucesivos, para finalmente llegar a la Grada. Estos bloques se crean a medida que las piezas se van agrupando en su bloque correspondiente y pasan por diferentes operaciones en los talleres.

Se caracterizan y representan todos los procesos realizados en los talleres. Se ha llevado a cabo una tarea laboriosa para identificar la información que mejor representa las operaciones realizadas. Una pequeña muestra relativa a estas operaciones se muestra en la Tabla 3, que representa una proporción muy pequeña del número total de ratios usadas en el modelo. Las mostradas a continuación (Tabla 3) se refieren, particularmente, a la primera estación de corte del taller de Elaboración y Previas.

Tabla 3: Ratios de la estación de corte

Capacidad (Nº nestings o chapas)
Tiempo de carga (s)
Movimiento de sobrante (s)
Tratamiento de bordes (m/min)
Proceso de corte (m/min)
Tiempo de descarga (s)

Con el propósito de facilitar el proceso de entrada de datos a la ingeniería de planificación del astillero, se ha desarrollado un panel de control de Excel o interfaz de usuario. Esto, junto con el comportamiento paramétrico del modelo, permite cambiar fácilmente ratios y duraciones de procesos en el mismo. Este archivo de Excel está conectado con el modelo a través de una macro de Excel VBA y contiene los datos más representativos de las operaciones realizadas en los talleres.

Mediante esta Macro VBA de Excel, el modelo permite exportar las duraciones totales que cada subbloque / bloque ha permanecido en los diferentes talleres, permitiendo distinguir entre tiempo de producción efectivo y el ocasionado por retrasos. Los resultados se pueden exportar a una tabla y, simultáneamente, se genera automáticamente un gráfico de Gantt. La Figura 2 muestra, resumidamente, la secuencia llevada a cabo por el modelo de simulación.

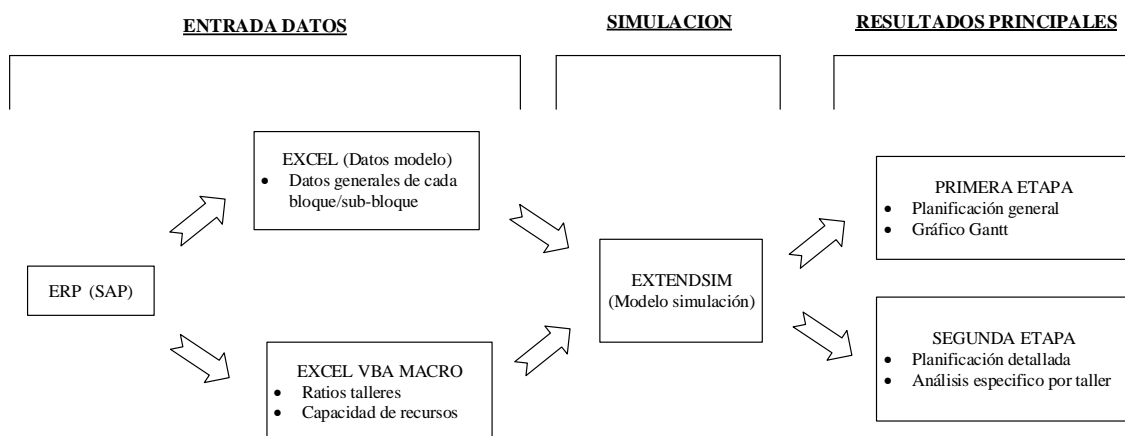


Figura 2: Diagrama del proceso de simulación.

4 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

A continuación, se presentan ejemplos de diferentes experimentos que se han realizado para confirmar la naturaleza multinivel del modelo. El primer experimento aborda el problema de la planificación agregada en las primeras etapas del proyecto, mientras que los dos últimos se centran en el análisis detallado de un taller en particular.

4.1 Análisis de una planificación mejorada

Como se mencionó anteriormente, la secuencia de llegada de los bloques a Grada es fija y viene definida por la estrategia constructiva del buque. Es necesario planificar y definir correctamente el momento de empezar a fabricar los componentes de cada uno de los bloques, teniendo en cuenta una correcta llegada de los mismos a la Grada y que ésta se produzca justo a tiempo para su ensamblaje. Aunque es posible sincronizar estas secuencias de entrada / salida, es complejo, en parte debido a las grandes diferencias entre bloques / subbloques en dimensiones, formas, condiciones estructurales, etcétera y en parte porque el proceso no es lineal, es decir, en ocasiones, varios subbloques se construyen simultáneamente en los talleres. Esta peculiaridad implica un duro trabajo de planificación ya que la construcción de un buque es un proyecto enorme que requiere la sincronización de muchos recursos durante la vida del proyecto.

El modelo permite evaluar no sólo diferentes secuencias de entrada de subbloques, sino también el día exacto para iniciar la producción de cada componente de subbloque.

En este experimento, se analizó la secuencia de planificación de fabricación en las primeras etapas del proyecto, cuando aún no se dispone de la ingeniería de detalle de los bloques. Se espera alcanzar, por lo tanto, una buena solución después de la comparación entre dos secuencias de planificación diferentes: planificación real de una fragata similar y una planificación mejorada.

Para encontrar un buen resultado que satisfaga los requisitos de construcción temporal, es decir, la planificación mejorada, se han hecho varias consideraciones. Ya que es conocido que las cabinas de Chorro y Pintura son el recurso más restrictivo del astillero, esta primera secuencia de planificación se ha calculado teniendo en cuenta la optimización de este recurso limitante. Se ha realizado una simulación preliminar para estimar el tiempo de permanencia de cada bloque en cada etapa del proceso de construcción. Estas duraciones, sin considerar esperas, representan el tiempo neto de fabricación de bloques y subbloques.

Dado que se conocen el tiempo neto de fabricación y la secuencia de llegada a Grada, se ha calculado una primera secuencia. Además, se calculó una segunda secuencia teniendo en cuenta la llegada prevista de los bloques a las cabinas de Chorro y Pintura. El resultado alcanzado muestra una primera aproximación a una secuencia de entrada de bloques válida, por lo tanto, el experimento consistió en la simulación de esta nueva y mejorada secuencia de entrada. Los resultados se compararon con la simulación de la secuencia de entrada de una fragata real, para lo cual el modelo también se ejecutó con esta secuencia de entrada de bloques que había tenido lugar anteriormente en el astillero para una fragata equivalente.

Después de analizar ambos resultados, la secuencia de entrada mejorada mostró una reducción del 30% en relación con la fabricación del buque equivalente real. Cabe señalar que ambas simulaciones se han llevado a cabo en las mismas condiciones y supuestos, sin tener en cuenta ciertas restricciones como los retrasos de los proveedores, las restricciones de ingeniería, etc.

El modelo genera resultados que se centran en el proceso de fabricación, por lo que es útil para la empresa evaluar los beneficios relacionados con la reducción del plazo de entrega. Cuando se termina la simulación, se genera automáticamente un diagrama de Gantt (Figura 3), mostrando los tiempos de permanencia de los subbloques a lo largo de las distintas etapas del proceso de construcción: desde el Taller de Elaboración y Previas hasta la Grada.

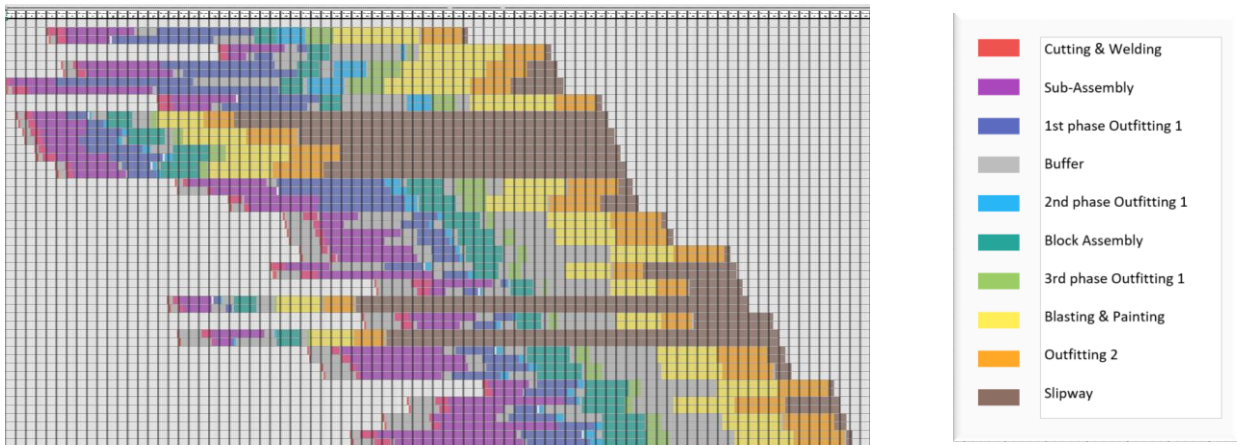


Figura 3: Diagrama de Gantt. Secuencia de entrada de bloques mejorada

La secuencia de entrada mejorada ha demostrado una considerable reducción de los tiempos de fabricación, así como una mejor utilización de los recursos. Como consecuencia, los retrasos se han reducido drásticamente equilibrando la carga de trabajo a lo largo de todo el proceso. La Figura 4 y la Figura 5 muestran las diferentes tasas de utilización en el taller de Prefabricación obtenido a partir de las simulaciones antes mencionadas. La Figura 4 muestra un uso significativamente más equilibrado de las celdas del taller que el mostrado en la Figura 5.

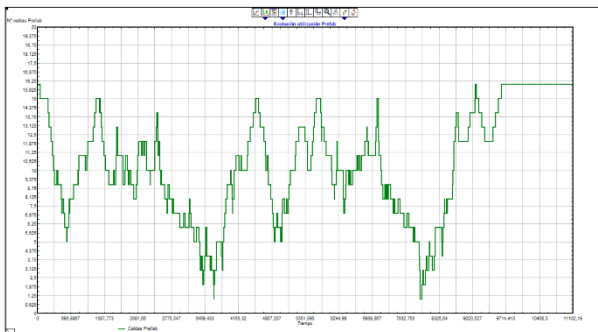


Figura 4: Celdas disponibles taller de Prefabricación. Secuencia mejorada

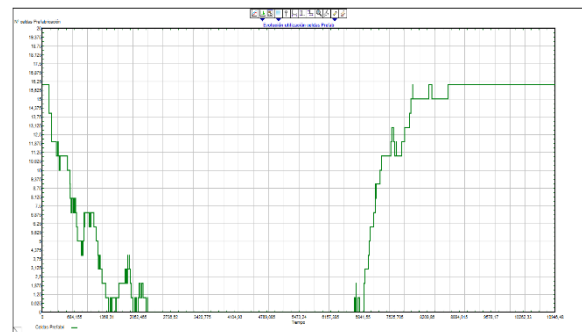


Figura 5: Celdas disponibles taller de Prefabricación. Secuencia real

Es destacable que la cantidad de bloques en buffers a lo largo del astillero se ha reducido considerablemente. En la Figura 6 se puede observar un menor número de bloques esperando el proceso de pintura en comparación con la cantidad de bloques resultante de la secuencia simulada real (Figura 7). La Figura 6 muestra un máximo de 6 bloques que esperan a ser pintados mientras que en la Figura 7 la cantidad es el doble, además los tiempos de espera se acortan en la secuencia mejorada (Figura 6) respecto a la real (Figura 7). Este tipo de resultados cobran gran importancia en términos de costos y el uso de recursos en la industria naval.

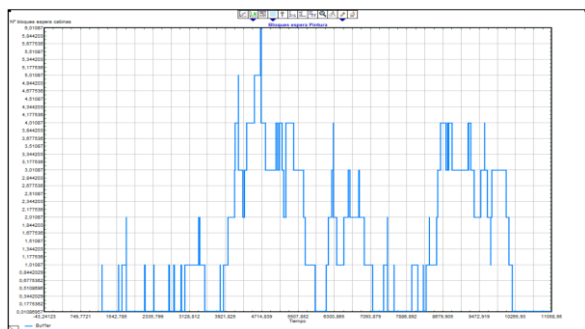


Figura 6: Buffer de bloques a la espera de entrar en Pintura. Secuencia mejorada

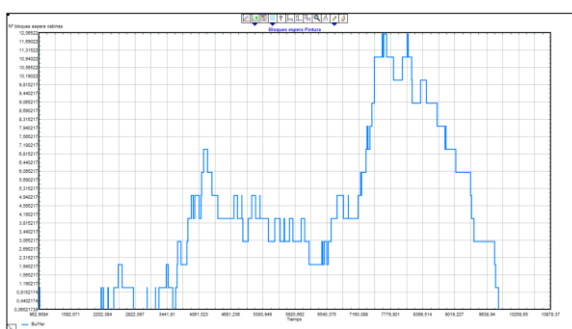


Figura 7: Buffer de bloques a la espera de entrar en Pintura. Secuencia real

4.2 Análisis detallado del Taller de Elaboración y Previas.

El taller de Elaboración y previas, como ya se ha explicado con anterioridad, dentro del astillero que es objeto de nuestro estudio, es el taller donde se lleva a cabo la primera etapa del proceso de fabricación de un buque, y por lo tanto será en él donde se fabriquen los elementos estructurales básicos. Poseer la capacidad de fabricación de estos elementos para tenerlos disponibles justo a tiempo para las siguientes etapas del proceso productivo, resulta totalmente imprescindible para el éxito del proyecto.

En este taller se reciben dos tipos de materia prima procedentes del almacén principal del astillero: los perfiles estructurales y las chapas de acero. Ambos seguirán caminos diferentes dentro del proceso productivo dependiendo del producto intermedio del que vayan a formar parte, paneles o previas.

- Los perfiles pasan por un proceso de chorreo previo al de oxicorte de donde saldrán con la longitud requerida antes de continuar su proceso de transformación correspondiente.
- Las chapas de acero serán cortadas en una de las dos máquinas de plasma existentes, dependiendo de si están destinadas a la fabricación de previas o paneles, de donde con posterioridad serán enviadas a la fase siguiente del proceso que les corresponda. En el caso de las chapas destinadas a la fabricación de previas, pasarán a la línea de fabricación de previas, las destinadas a la fabricación de paneles pasarán a la línea de paneles planos y finalmente las chapas destinadas a la fabricación de paneles curvos pasarán a la zona de curvado desde donde serán enviadas con posterioridad al taller de Prefabricación.

En este taller, probablemente el más automatizado de todo el astillero, existen dos líneas de fabricación que han de ser destacadas:

- La línea de fabricación de paneles planos, donde las chapas pasan por diferentes estaciones y procesos. El proceso comienza en la estación OSW, aquí las chapas son soldadas conformando los paños de los paneles, posteriormente estos se giran en la estación PTU de donde pasarán a la estación de chorreado y marcado de los paños, MGB. Una vez se haya finalizado esta fase los paneles pasarán a la estación de armado y soldado de elementos longitudinales, SMWP y finalmente, pasarán a las estaciones de armado (SSMP) y soldadura de previas (VRWP), tipo baos y esloras. Cabe destacar

que todas estas estaciones están automatizadas. Resulta importante destacar por otro lado, que no todos los paneles planos se fabrican en esta línea, existen paneles que por su tamaño no pueden ser procesados en ella de forma que sus componentes son enviados al Taller de Prefabricación donde serán ensamblados al igual que sucede con los paneles curvos.

- La línea de fabricación de previas, donde al igual que en la línea de paneles planos se distinguen varias estaciones de trabajo. En este caso dos: la línea de marcado y armado (SSMP), y la estación de soldadura (VRWP).

Dado el papel crítico de este taller dentro del proceso productivo general, se decide emplear el modelado y simulación para analizar cuál sería el dimensionamiento adecuado de esta etapa dada una capacidad de producción determinada, minimizando el coste. A través de la experimentación del modelo de simulación se detectaron los recursos limitantes de la capacidad productiva del taller, siendo la línea de fabricación de previas el más destacado. Un análisis posterior revela que la estación de soldadura, VRWP, es el recurso limitante dentro de esta línea. Los resultados de la simulación del modelo muestran que la estación de soldadura es el cuello de botella, siendo su utilización de un 97,2 % frente a una utilización de la estación de marcado y armado, SSMP, del 29%.

Después de analizar los costos intrínsecos asociados a la actuación en las distintas estaciones, se vio que el aumento de la capacidad de la estación de soldadura en la línea de previas aumentaría la capacidad general del taller, reduciendo el makespan de este taller a la mitad.

El modelo de simulación demostró ser una herramienta útil para analizar el impacto que la capacidad de los recursos tendría sobre el conjunto global, siendo capaz de encontrar la mejor solución que cumpla los requisitos de tiempo con el número mínimo de recursos asignados. También demostró ser eficaz en la identificación de cuellos de botella para luego seleccionar las acciones más adecuadas y aliviarlos. Se pueden encontrar más detalles del experimento en el documento (Rouco-Couzo et al. 2016).

4.3 Análisis de la máxima capacidad de la línea de paneles planos

Para el cálculo de la máxima capacidad de producción de la línea de paneles planos se ha hecho uso de la experimentación del modelo de simulación desarrollado. Dicho experimento se ha llevado a cabo mediante la saturación de la línea y por tanto convirtiéndolo en el recurso más ocupado de todo el taller. Además, se ha ejecutado el modelo introduciendo el montaje de baos y esloras en esta etapa de fabricación, que en la actualidad se montan en una fase posterior del proceso.

Para conseguir la saturación del modelo se generan todos los elementos que conformarían dos fragatas idénticas al inicio de la simulación obteniendo así el máximo rendimiento posible de la línea.

Con el fin de dimensionar adecuadamente la línea, y obtener así la máxima capacidad de la misma se experimenta el modelo probando una serie de combinaciones de las estaciones de armado (SSMP) y de soldadura (VRWP) (la línea de fabricación de paneles planos está configurada actualmente por una estación de montaje y dos estaciones de soldadura y opera en un turno). También se analizó el impacto que tendría sobre la capacidad global de la línea el añadir un turno adicional.

De los resultados obtenidos de la experimentación que a continuación se exponen en la Tabla 4, se desprende que la combinación más favorable sería la conformada por dos estaciones de montaje y dos estaciones de soldadura.

Tabla 4: Máxima capacidad de producción de la línea de paneles planos

Turnos	Estaciones de montaje	Estaciones de soldadura	Capacidad máxima (95% IC) (paneles/semana)	Capacidad máxima (95% IC) (bloques/semana)
1	1	1	2.598 ± 0.015	0.411 ± 0.002
	1	2	2.756 ± 0.014	0.436 ± 0.002
	2	2	4.646 ± 0.042	0.735 ± 0.007
	2	4	4.759 ± 0.042	0.753 ± 0.007
	2	1	3.686 ± 0.026	0.583 ± 0.004
2	1	1	5.138 ± 0.060	0.813 ± 0.010
	1	2	5.487 ± 0.044	0.868 ± 0.007
	2	2	9.340 ± 0.110	1.478 ± 0.017
	2	4	9.550 ± 0.066	1.511 ± 0.010
	2	1	7.365 ± 0.053	1.165 ± 0.008

El modelo de simulación obtenido permite al planificador la experimentación de varias alternativas con el fin de determinar la más favorable para el proceso.

La decisión de añadir o no un turno adicional dependerá de la capacidad necesaria para cumplir con los hitos acordados con el cliente y de los costes asociados a la operación que no han sido objeto de estudio de este trabajo.

5 CONCLUSIONES

En este estudio se presenta un modelo de simulación multi-nivel que minimiza las incertidumbres del proceso de construcción naval. El modelo funciona a dos niveles, que coinciden con diferentes fases del proceso constructivo de un buque: a un nivel agregado (fase inicial) y a un nivel detallado (fase avanzada). Empleando el software de eventos discretos ExtendSim, se analizan tres casos de estudio.

El primer experimento aborda el problema de la planificación agregada en las primeras etapas del proyecto. El modelo demuestra ser particularmente útil para la toma de decisiones de planificación en una fase inicial del proyecto, cuando aún no se dispone de datos técnicos detallados. Además, se consigue una secuencia de entrada de bloques mejorada, a través de la cual se obtiene no sólo una reducción del makespan del proceso, sino también una utilización más equilibrada de los recursos a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto.

El segundo y tercer experimentos se centran en el análisis detallado de un taller en particular, el taller de Elaboración y Previas. A través del segundo experimento se demuestra que el modelo es eficaz para identificar

cuellos de botella y analizar el efecto que tendría la actuación sobre la capacidad de los recursos en el makespan, obteniendo la solución que mejor cumple los requerimientos de tiempo con el mínimo de recursos asignados. El tercer experimento se utiliza para determinar la capacidad máxima de la línea de fabricación de paneles planos y se encuentran y prueban varias alternativas que cumplen con los hitos del cliente.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido desarrollada dentro de la iniciativa Industria 4.0 emprendida por el Área de Modelado y Simulación de la Unidad Mixta de Investigación UDC-Navantia. Los autores agradecen a Navantia y a la Universidade da Coruña su valioso apoyo, así como a la Xunta de Galicia y a la Axencia Galega de Innovación (GAIN) que financian esta Unidad de Investigación.

REFERENCIAS:

- Bair, Frédéric, Yves Langer, Jean-David Caprace, and Philippe Rigo. 2013. "Modelling, Simulation and Optimization of a Shipbuilding Workshop." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53 (9): 1689–99. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Burnett, Gabriel A., D. J. Medeiros, Daniel A. Finke, and ark T. MTraband. 2008. "Automating the Development of Shipyard Manufacturing Models." *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 1761–67. <http://www.informs-sim.org/wsc08papers/263.pdf%0Apapers3://publication/uuid/5B79C987-457C-4AA8-9645-54FEE99B6924>.
- Caprace, Jean-David, Roberto Moreira Freire, Luiz Felipe Assiss, Carlos Martin Pires, and Philippe Rigo. 2011. "Discrete Event Production Simulation in Shipyard Workshops." *Proceeding of the 21th COPINAVAL*, 20.
- Cho, K.K., K.H. Chung, C. Park, J.C. Park, and H.S. Kim. 2001. "A Spatial Scheduling System for Block Painting Process in Shipbuilding." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50 (1): 339–42.
- Duclos, Leslie K., Robert J. Vokurka, and Rhonda R. Lummus. 2003. "A Conceptual Model of Supply Chain Flexibility." *Industrial Management & Data Systems* 103 (6): 446–56. doi:10.1108/02635570310480015.
- Ginsberg, Allen S., Harry M. Markowitz, and Paula M. Olfdather. 1965. "Programming by Questionnaire."
- Jae Kyu Lee, Kyoung Jun Lee, June Seok Hong, Wooju Kim, Eun Young Kim, Soo Yeoul Choi, Ho Dong Kim, Ok Ryul Yang, and Rim Hyung Choi. 1995. "DAS : Intelligent Scheduling Systems for Shipbuilding." *The AI Magazine* 16 (4): 78–94.
- Kiran, Ali S, and Juan Cabrera. 2001. "Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros, and M. W. Rohrer, Eds." *Simulation*, 877–81.
- Lamb, Thomas, Hyun Chung, Mark Spicknall, Jong Gye Shin, Jong Hun Woo, and Philip Koenig. 2006. "Simulation-Based Performance Improvement for Shipbuilding Processes." *Journal of Ship Production* 22 (2): 49–65.
- M, Krause M; Roland F; Steinhauer D; Heinemann. 2004. "Discrete Event Simulation: An Efficient Tool to Assist Shipyard Investment and Production Planning." *Journal of Ship Production* Volume 20,.

- Meijer, K., J. Pruyn, and J. Klooster. 2009. "Early Stage Planning Support." *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding 2009, ICCAS; Shanghai; China; 1 September 2009 through 3 September 2009; Code 80018* Volume 2,; Pages 1023-1027.
- NRC. 1998. *Visionary Manufacturing Challenges for 2020*. Edited by DC: National Washington and Academy Press.
- Park, Changkyu, Kuy-Hoon Chung, Ju-Chull Park, Kyu-Kab Cho, Tae-Hyun Baek, and Eun-Il Son. 2002. "A Spatial Scheduling Application at the Block Paint Shop in Shipbuilding: The HYPOS Project." *Production Planning & Control* 13 (4): 342–54. doi:10.1080/095372802760108309.
- Rose, C.D., and J.M.G. Coenen. 2016. "Automatic Generation of a Section Building Planning for Constructing Complex Ships in European Shipyards." *International Journal of Production Research*. doi:10.1080/00207543.2016.1182655.
- Rouco-Couzo, Marcos, Diego Crespo-Pereira, Alejandro Garcia-del-Valle, Mar Cebral-Fernandez, and Rosa Rios-Prado. 2016. "Discrete Event Simulation to Improve Cutting-Welding Workshop in a Shipyard." *The 28th European Modeling & Modeling Symposium (Simulation in Industry)*. Larnaca, Cyprus.
- Seo, Yoonho, Dongmok Sheen, and Taioun Kim. 2007. "Block Assembly Planning in Shipbuilding Using Case-Based Reasoning." *Expert Systems with Applications* 32 (1): 245–53. doi:10.1016/j.eswa.2005.11.013.
- Shin, Kwon y Ryu 2008. 2008. "Heuristic and Metaheuristic Spatial Planning of Assembly Blocks with Process Schedules in an Assembly Shop Using Differential Evolution." *Production Planning & Control* 19 (6): 605–15. doi:10.1080/09537280802474941.
- Steinhauer, D. 2011. "The Simulation Toolkit Shipbuilding (STS) –10 Years of Cooperative Development and Interbranch Applications." *Compit* 11, 453–65.
- Zheng, Junli, Zhibin Jiang, Qiang Chen, and Qunting Liu. 2011. "Spatial Scheduling Algorithm Minimising Makespan at Block Assembly Shop in Shipbuilding." *International Journal of Production Research* 49 (8): 2351–71. doi:10.1080/00207541003709536.
- Zhuo, Liu, David Chua Kim Huat, and Keng Hwee Wee. 2012. "Scheduling Dynamic Block Assembly in Shipbuilding through Hybrid Simulation and Spatial Optimisation." *International Journal of Production Research* 50 (20): 5986–6004. doi:10.1080/00207543.2011.639816.