

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/341256269>

Consideraciones para un Modelo de Simulación de Procesos Aplicado en Construcción Naval: Caso Armada de Colombia

Article in RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao · May 2020

CITATION

1

READS

357

5 authors, including:



Oscar Mayorga Torres

Universidad Francisco de Paula Santander

9 PUBLICATIONS 9 CITATIONS

SEE PROFILE



Jose Riola

Universidad Politécnica de Madrid

35 PUBLICATIONS 134 CITATIONS

SEE PROFILE



Carlos Hernán Fajardo-Toro

41 PUBLICATIONS 83 CITATIONS

SEE PROFILE



Miguel Andrés Garnica López

Armada de Colombia

13 PUBLICATIONS 113 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Gestión del Conocimiento en Docencia Universitaria [View project](#)



Estudio de Ergonomía [View project](#)

Consideraciones para un Modelo de Simulación de Procesos Aplicado en Construcción Naval: Caso Armada de Colombia

Javier Díaz Reina¹, Carlos Hernán Fajardo-Toro², Oscar Mayorga Torres³, José María Riola⁴, Miguel Andrés Garnica López⁵

diazre21466@universidadean.edu.co, cfajardo.toro.academico@gmail.com, oscarmtorres@ufps.edu.co, jinvestigacionnaval@escuelanaval.edu.co, mgarnica@cotecmar.com

¹ Armada República de Colombia – ARC, Bogotá, D. C., Colombia.

² Corporación Universitaria Unitec . Bogotá D.C. Colombia.

³ Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

⁴ Escuela Naval de Cadetes “Almirante Padilla” – ENAP. Cartagena de Indias, Colombia.

⁵ Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial – COTECMAR. Cartagena de Indias, Colombia.

Pages: 553–569

Resumen: La simulación de procesos es una herramienta que posibilita la toma de decisiones en una línea productiva, logística o de servicios, a partir de un modelo conceptual que desarrollado en un *software* presenta escenarios donde se mejoran las condiciones, restricciones o variables para intervenir en el proceso real. El presente artículo aborda las consideraciones de lógica, características, alcance, restricciones y variables de un modelo de simulación específico para la construcción naval de buques tipo OPV¹ en la Armada de Colombia, con el objetivo de hacer mejoras, combinaciones, eliminaciones o ampliaciones de las capacidades disponibles del proceso actual, que permita estimar construcción naval futura y, en especial, buques de guerra (*combatant ships*²) de mayor tamaño.

Palabras clave: Modelo de simulación, procesos, buques de guerra, capacidad disponible

Considerations for a Process Simulation Model Applied in Shipbuilding: Colombian Navy Case

¹ El *Offshore Patrol Vessel* es un barco altamente versátil, diseñado para desempeñar funciones de gestión de la Zona Económica Exclusiva, incluida la provisión de seguridad marítima a las zonas costeras y el alivio efectivo de desastres. BAE SYSTEM (2019).

² Un buque de guerra o de combate es un buque construido y destinado principalmente a la guerra naval. Por lo general, pertenecen a las fuerzas armadas de un Estado. Ley del Mar ONU-OMI (1982).

Abstract: Simulation of processes is a tool that enables decision-making in production, logistics, or service line, based on a conceptual model that developed in software presents scenarios where conditions, restrictions or variables are improved to intervene in the real process. This article addresses the considerations of logic, characteristics, scope, constraints, and variables of a specific simulation model for the naval construction of OPV-type ships in the Colombian Navy, with the aim of making improvements, combinations, eliminations or extensions of the available capabilities of the current process, which allows estimating future shipbuilding and, especially, larger warships (combatant ships).

Keywords: Simulation model, processes, warships, available capability

1. Introducción

La necesidad de construir buques flexibles y adaptables a muchas operaciones es un mantra dentro de los países de la Organización del Tratado del Atlántico Norte – OTAN. Lo entienden como un gran salto en sus capacidades de interoperabilidad, pero, además, la construcción modular de los buques ha provocado que varias armadas lo consideren una necesidad por sus ahorros en coste y tiempo. La construcción modular lleva representando el estado del arte de la arquitectura naval desde los años 90 (Lee, Shin, & Ryu, 2009), y ha tenido un fuerte impulso a partir de los grandes desarrollos de la automática y la robótica en los astilleros. Se caracteriza por la filosofía de construcción modular tanto en el propio proyecto como en la producción, alcanzando un alto nivel de estandarización en sus productos intermedios aplicables a distintos buques (Ju, Sung, Shen, Jeong, & Gye, 2020; Song & Woo, 2013). Con base en ello, los astilleros de buques de guerra están llevando a cabo unas estaciones de trabajo y unas líneas de producto especializadas en tipos de bloques con un alto grado de robotización. Tal es su importancia que la OTAN estableció un grupo de trabajo en Modularidad de Misión (ST/MM) para producir estándares en diseño, operación, logística y mantenimiento de los buques.

Por otra parte, la fabricación de buques de guerra para operaciones de seguridad y defensa ha tenido una réplica en países latinoamericanos como Colombia, donde a través de procesos de capacitación, adaptación, desarrollo y manufactura, se ha logrado fabricar buques tipo OPV para el servicio de las operaciones militares en el territorio nacional. La empresa responsable del desarrollo de esta línea de conocimiento e investigación es la Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial – COTECMAR, la cual se ha consolidado como una organización innovadora que trabaja dentro del campo de la investigación científica y tecnológica, apoyando el desarrollo de la industria marítima colombiana. Por lo anterior, este artículo está centrado en las variables que afectan un modelo productivo específico, basado en una estrategia constructiva propia del astillero de COTECMAR.

En el astillero de COTECMAR se ha llevado a cabo la construcción de 125 nuevos cascos desde el año 2001, lo que coincide con el inicio de operación del astillero. Desde ese entonces, el buque de mayor complejidad hasta ahora construido es un buque de patrullaje oceánico (OPV 80), el cual va en su tercera versión y constituye la antesala de la fabricación de buques de guerra tipo corbeta o fragata, que deberán reemplazar

las actuales unidades tipo Fragata FS-1500, proyecto que se convierte en el reto de construcción naval más importante de la historia para Colombia y que incorpora grandes progresos en la metodología empleada en sus fases de conceptualización y definición (OTAN, 2010).

El objetivo principal de este artículo es mostrar el proceso y consideraciones que se están tomando para la construcción de los modelos de simulación, los cuales servirán como soporte para la toma de decisiones en el diseño del proceso de construcción de la Plataforma Estratégica de Superficie – PES.

Para ello, se hará un resumen de las técnicas y sistemas de modelación utilizados en entornos navales de construcción de buques para, posteriormente, hacer una exposición de la estrategia de producción con la que se trabajará y, finalmente, la forma en que se obtendrán los datos y cómo se entenderán las partes del proceso, así como los métodos para la selección del *software*.

2. Simulación en sistemas navales

La modelización y simulación son actividades indispensables cuando se tiene que realizar el análisis y diseño de sistemas multidisciplinares de cierta complejidad, como es el caso de un buque de guerra que lleva cientos o miles de equipos a bordo. El objetivo de la simulación, en este caso, no es otro que darle al diseñador una ayuda necesaria durante el proceso de diseño y análisis de la ingeniería del buque (Caprace, Da Silva, Rigo, & Martin, 2011).

En el sector marítimo, existen múltiples aplicaciones de simulación, especialmente las relacionadas con fluidos conocidas como dinámica de fluidos computacional, o CFD por sus siglas en inglés, (Gwynne, Filippidis, Galea, Cooney, & Boxall, 2007; Shams et al., 2019), en las que se pueden destacar las simulaciones enfocadas en programas de cálculo de estructuras y arquitectura naval, maniobra y comportamiento del buque en puerto (Ypma & Turner, 2019), resistencia al avance, comportamiento en la mar, maniobrabilidad, sistemas de propulsión, salas de control de cuartos de máquinas, de puente, navegación, maniobras *off-shore* para el suministro a plataformas petrolíferas, operaciones con posicionamiento dinámico (Djačkov et al., 2018; Garrett & Mair, 1995), operaciones de lanzamiento y recogida de vehículos con o sin tripular, operaciones de manipulación de anclas, instalación de parques eólicos, grúas, carga de líquidos, manipulación de agua de lastre, servicios de tráfico marítimo, cartas electrónicas, comunicaciones, evacuación del personal, y así una gran cantidad de posibles simulaciones.

Pero de todas estas simulaciones, son las hidrodinámicas las propias de la ingeniería naval, denominando hidrodinámica numérica al conjunto de las herramientas que permiten resolver problemas relacionados con la hidrodinámica del buque (Djačkov et al., 2018; Mansoori & Fernandes, 2016; Trubat, Molins, & Gironella, 2019; S. Wang et al., 2018), es decir, poder simular con la ayuda de un computador los distintos ensayos que podrían realizarse en un tanque de experiencias hidrodinámicas. Al conjunto de estas técnicas se les suele conocer como CFD (Riola, Diaz-Cuadra & Beltran, 2019).

Ahora bien, por otra parte, está la simulación de los procesos de producción y ensamble de los buques. Estas simulaciones se han entendido de naturaleza discreta, haciendo inicialmente una representación del astillero para mostrar el flujo de actividades en las diferentes etapas (Williams, Finke, & Traband, 2001) (Krause, Roland, Steinhauer, & Heinemann, 2004), así como también haciendo una simulación, bajo sistemas discretos, de cada uno de los bloques logísticos que comprenden la construcción del barco (C. Wang, Mao, Xiang, & Zhou, 2015). Para ello se ha recurrido a una representación de los procesos con herramientas como IDEF0 y UML (Kim, Lee, Park, & Lee, 2005). Otros trabajos han agregado, además de la simulación del astillero, la simulación de la instalación del equipamiento (König, Beißert, Steinhauer, & Bargstädt, 2007). Se han propuesto metodologías como las de Hadjina, (2009), el cual propone siete (07) fases que van desde la concepción del modelo según el diseño hasta la validación con base en diferentes escenarios.

En el siguiente apartado se hará la exposición de los aspectos generales de un marco de trabajo para el desarrollo un modelo de simulación para la estimación y planificación de construcción de la futura PES que quiere la Armada de Colombia, tomando para ello los conceptos antes mencionados, dichos procesos como sistemas discretos y por bloques, pero, además, ajustado a las características y restricciones del sistema colombiano.

3. Simulación de procesos de construcción naval

Este apartado se centrará en los aspectos que han sido tenidos en cuenta para abordar un modelo específico, basándose en una estrategia de construcción naval establecida para el caso colombiano de construcción de buques tipo OPV³. El modelo será la base para la generación de información que permita estimar cualquier construcción naval y, en especial, buques de guerra –*combatant ships*⁴– de mayor tamaño. Para este caso, se observa la información obtenida de la construcción naval en Colombia, específicamente la recolectada en la construcción naval que se desarrolla en COTECMAR. Se puede encontrar una generalización del tema para buques tipo fragata en Riola et al (2019).

Una gran incertidumbre nace de la capacidad instalada de COTECMAR para abordar este proyecto, factibilidad que debe ser validada desde diferentes aspectos y con la participación de una variedad de actores. Debido a dicha incertidumbre, una modelación y simulación del proceso constructivo se convierte en una herramienta de gran utilidad para la toma de decisiones con miras a determinar la factibilidad de utilizar las capacidades tecnológicas actuales o, en su defecto, determinar la necesidad de modificarlas. Como publicación complementaria, se puede mencionar “The Naval Ship Code” publicado por la OTAN como “Allied Naval Engineering Publication (ANEP) 77”, que permite que se aplique una norma de seguridad internacionalmente aceptada –comparada con las convenciones y resoluciones de la OMI– a los buques de guerra de superficie, y en general todos los documentos producidos por el “Specialist Team on Mission Modularity (ST/MM)” establecido por la OTAN para crear estándares y normativas en diseño de módulos, operatividad, logística y mantenimiento de los buques (American Bureau of Shipping, 2019).

3.1. Producción por Proyecto

Para considerar la modelación de la construcción de un barco o buque, se debe tener presente que esta actividad industrial claramente cumple todas las características de un proceso de producción por proyecto. A este modelo de producción, en el cual los recursos y procesos se adaptan al producto, también se le denomina producción bajo pedido y concentra la totalidad de los esfuerzos en fabricar un solo producto a la vez y con características únicas. Para esta estrategia de producción, los resultados serán siempre diferentes en cada proyecto, y está asociada siempre a una actividad intensiva en el uso de la mano de obra; por eso el concepto de buques hermanos, los proyectos son similares, pero nunca son iguales por no ser una producción estándar. La construcción naval en cualquier nivel tecnológico del astillero, siempre cuenta con metodología de producción mezclada entre actividades manuales (horas/hombre) y mecánicas, que siguen una estrategia constructiva propia de cada astillero (EAE Business School, 2018).

Como fuente inicial de información, se tomarán los registros del desarrollo del buque OPV 80 III ARC “Victoria” (figura 1), cuya construcción finalizó en 2017, y que se constituirá en el proceso de construcción base del modelo. Este buque es una plataforma al servicio de la Armada de Colombia que tiene como misión específica desarrollar operaciones de interdicción, patrullaje, control de tráfico marítimo y búsqueda y rescate, así como operaciones de paz, ayuda humanitaria y control del medio ambiente. Es el tercer buque de su clase construido en Colombia (COTECMAR, 2015). La tabla 1 muestra las características técnicas y variables del buque OPV 80 III ARC “Victoria”.

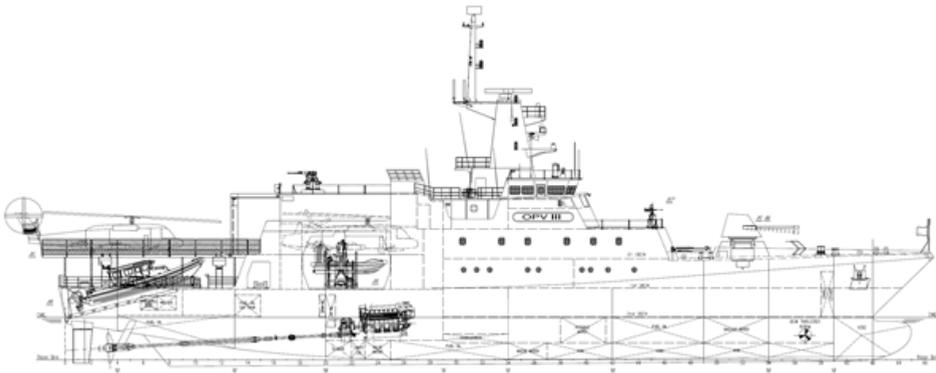


Figura 1 – OPV 80 III. Fuente: (COTECMAR, 2017)

Aspecto	Medida
Eslora total:	80,60 m
Manga moldeada:	13,60 m
Calado medio a plena carga:	4,5 m

Aspecto	Medida
Desplazamiento plena carga:	1828 t
Velocidad máx.:	21 nudos
Autonomía:	40 días; 4500 NM @ 12 nudos; 1500 NM @ 21 nudos
Tripulación:	64 tripulantes
Planta eléctrica:	03 x 450 kVA + 01 de emergencia 125 KVA
Material del casco:	Acero ASTM A131 <i>grade</i> AH32
Sistema de propulsión:	02 x motor diésel marino Wärtsilä serie 12V26 @ 1000 rpm

Tabla 1 – Características OPV 80 III

3.2. Capacidad disponible

Cuando se aborda el trabajo de diseñar un modelo de simulación basado en un sistema existente, se cuenta con la ventaja de conocer con claridad sus capacidades tecnológicas y de producción, y una disminución de la incertidumbre asociada al comportamiento de las variables, así como la obtención de indicadores de rendimiento y desempeño reales, tanto de los equipos como de la mano de obra. Igualmente, se cuenta con la posibilidad de identificar el comportamiento de las distribuciones de probabilidad de las variables asociadas. Así las cosas, se puede hacer referencia a la disponibilidad de indicadores de rendimiento en COTECMAR que se convertirán en datos y en la formulación matemática de entrada para modelar el sistema de producción. En consecuencia, para este trabajo se dispone de la siguiente información:

- Capacidades proceso de construcción en aceros:
 - Equipo de corte (pantógrafo) CNC.
 - Dobladora de perfiles.
- Equipos aplicación de soldaduras:
 - Equipo multiproceso: Equipo para soldadura con electrodo revestido (SMAW). Soldadura TIG (GTAW) CD, especializado para soldadura con electrodo tubular y núcleo de fundente (FCAW) y soldadura MIG (GMAW) con electrodo micro alambre y MIG pulsado (MIG-P).
 - Equipo arco sumergido: Tractor de arco sumergido A2T.
 - Equipo soldadura electrodo manual SMAW y GTAW: Equipo para proceso SMAW y GTAW.
 - Carro soldador magnético con oscilador: Carro con oscilador magnético para posición horizontal y vertical.
 - Equipo tractor con riel para soldar (todas las posiciones): Tractor con oscilador para soldar y cortar en todas las posiciones; para operar en procesos FCAW y GMAW.

3.3. Áreas de construcción

La distribución geométrica de las áreas de construcción y el flujo de la producción son base fundamental para la modelación del sistema, lo que guiará físicamente la creación del modelo digital en su conceptualización y definición. En la Planta de COTECMAR ubicada en Mamonal, Cartagena de Indias, existen tres (03) áreas de trabajo donde se ejecutan los siguientes subprocesos:

- Área 1:
 - a. Línea de láminas: Corte, marcado de lámina, preparación de los paquetes de construcción.
 - b. Línea de perfiles: Corte y doblado.
 - c. Línea de tubería: Corte, doblado, conformado, soldadura y pruebas hidrostáticas.
 - d. Conformación de previas o subensambles: Armado, soldadura e inspección.
- Áreas 2 y 3:

Las áreas 2 y 3 serán las áreas de ensamble y levantamiento del casco; los siguientes subprocesos serán ejecutados en esta área:

 - a. Construcción de paneles.
 - b. Construcción de bloques.
 - c. Levantamiento del casco.
 - d. Trabajos de equipamiento (*outfitting*) a nivel de bloque, anillo y zona.

3.4. Estrategia de construcción

La estrategia de construcción requiere de tres (03) paquetes de información que son suministrados en la fase de ingeniería de producción. Estos no forman parte del proceso específico de construcción que se pretende modelar, pero para este análisis es considerado como un insumo disponible para definir el proceso a ser simulado. Es de resaltar que esta información es entregada en el programa de diseño de ingeniería naval AVEVA Marine. Con el fin de apoyar la contextualización de las entradas a un modelo de simulación, se desarrollará un corto análisis del alcance de estos paquetes de información.

- a. Casco: El casco se construye por bloques. Para ello se entrega información para construcción de cunas, previas y ensambles. Adicionalmente, se generan los planos para unión de bloques de acuerdo con la estrategia de unión establecida para la erección del casco.
- b. *Outfitting* en caliente: Este paquete implica la información detallada de dónde se debe intervenir la estructura (marcar, perforar, soldar). Incluye los datos necesarios para construcción de tubería de diámetro mayor a 25 mm, estándares de penetración (paso por compartimentos), conexiones a tanques, escalas, escaleras, estándares para soportes (de tubos, conductos de ventilación, bandejas eléctricas, cielo raso), barandas, bandejas, soporte piso flotante y paneles húmedos, luminarias, pasamanos, estanterías, planos marcas de casco, tapones, bandejas recolectoras, equipos de seguridad. Con relación a la

fabricación de tubería, la información se entrega por bloque, y la de instalación será entregada por bloque, anillo y/o zona de acuerdo con el plan de ensamble de bloques. El resto de *outfitting* en caliente se preparará por anillo o zona, de acuerdo con la utilidad que tenga para producción, ya que su configuración en maqueta no está restringida por bloque, como ocurre normalmente en tubería y casco.

- c. Para información general, se entregan planos que contienen dirección de espesores, conexiones estructurales, penetraciones, definición de excesos de bloques y elementos estructurales específicos de mamparos, cubiertas y costados.
- d. *Outfitting* en frío: Equipamiento que no requiere intervención de la estructura. En esta etapa se considera que el buque ya está pintado. Incluye planos de instalación de tuberías de materiales especiales (Ej.: viega press y lorox) y conductos de ventilación en zonas habitables; bandejas portacables, disposición de equipos eléctricos, instalación de pisos. También hace parte de este grupo la información para conformación de sistemas en tubería menor a 25 mm, de la cual se suministran los trazados propuestos de reserva de espacio con accesorios incluidos. Aquí también se contempla la lista de cables, conformación de paneles y cielo raso, e instalación de mobiliario.

En cuanto a secuencia de la construcción del casco y la superestructura, se puede tomar como referencia la distribución de las zonas de construcción mencionadas en el punto anterior, y es posible deducir las fases de la línea de construcción para el casco y la superestructura. En relación con el corte y arme de piezas en acero, se encuentran: Corte de perfiles y láminas, fabricación de previas, ensamble de bloques y levantamiento del casco (COTECMAR, 2015). Para a la fabricación de tubería se tienen los procesos de corte, conformado, soldadura, pruebas hidrostáticas y la instalación a bordo del buque.

Como ya se mencionó, el buque se construye por bloques bajo una secuencia predeterminada. Estos bloques se unen para constituir anillos, los anillos se unen para crear las zonas, y las zonas conforman el buque.

La estrategia de construcción del buque OPV 80 comprende la división de toda su estructura en cuarenta (40) bloques con un peso no superior a cincuenta (50) toneladas, siete (07) anillos, y siete (07) zonas, distribución que puede observarse en la figura 3 con la siguiente nomenclatura:

- Dígito 1: Número de zona.
- Dígito 2: Número de anillo.
- Dígito 3: Número indicador de nivel de forma secuencial.
- Dígito 4: Número de orden en nivel horizontal, babor, estribor, proa o popa.

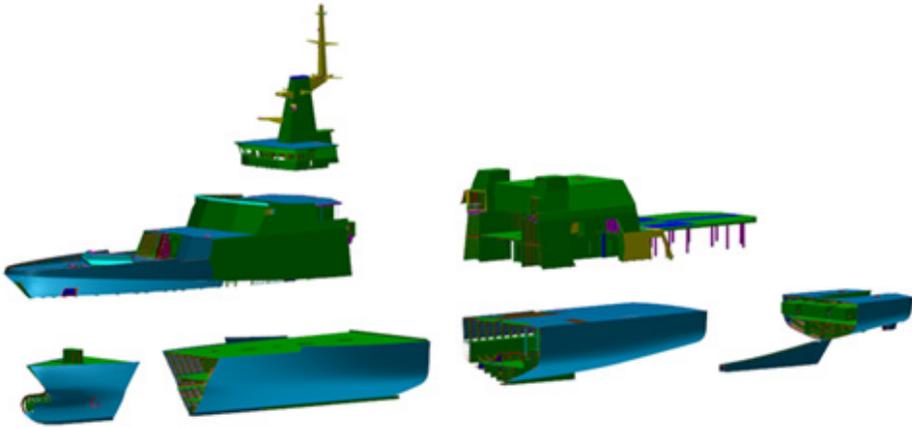


Figura 2 – Estrategia de Ensamble OPV III. Fuente: (COTECMAR, 2015)

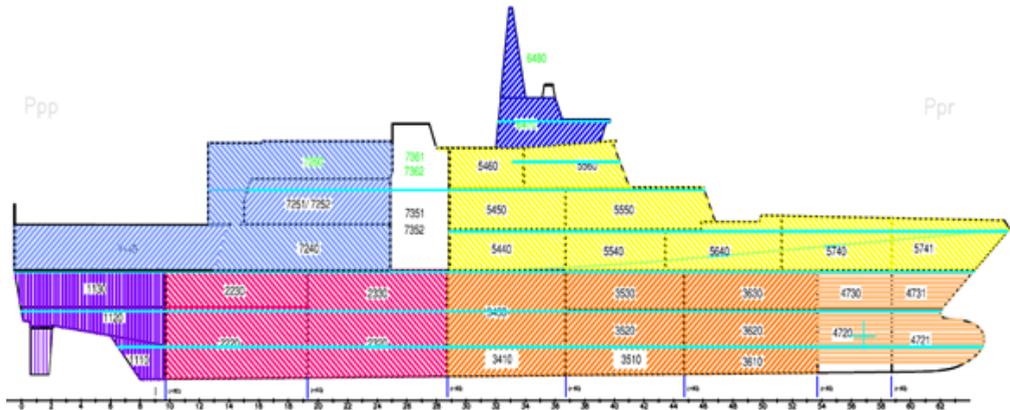


Figura 3 – Distribución de bloques, anillos y zonas OPV 80. Fuente: (COTECMAR, 2015)

Igualmente, esta estrategia constructiva detalla la secuencia de ingreso de equipos que comprenden los sistemas de mayor tamaño y peso que deben ser ingresados al buque antes de cerrar algunas áreas. Cabe mencionar que en algunos casos se prevé dejar paneles sueltos (sin soldadura final) con el fin de facilitar el ingreso de algunos equipos que, por sus tiempos de entrega, no puedan ser ingresados en la etapa previa al ensamble de bloques.

Definida la estrategia constructiva de un buque tipo OPV 80, se procede a desarrollar el cronograma de trabajo en cumplimiento de lo consignado en la estrategia de construcción.

3.5. Taxonomía de un buque de guerra

La Armada de Colombia ha adoptado el ESWBS (Expanded Ship Work Breakdown Structure) para la codificación jerárquica (HSC) de la estructura, sistemas, equipos y componentes de los buques. El ESWBS, utilizado por la marina de los Estados Unidos (US NAVY, 2016), proporciona un método para integrar diseño, configuración y codificación estándar de logística de la estructura de desglose para portaaviones, submarinos, buques de guerra y sistemas asociados; asimismo, proporciona una lista de todos los sistemas, subsistemas y componentes de buques (ver tabla 2).

<i>ESWBS group number</i>	<i>Functional group nomenclature</i>
100	<i>Hull structure group</i>
200	<i>Propulsion plant group</i>
300	<i>Electrical plan group</i>
400	<i>Command and surveillance group</i>
500	<i>Auxiliary group</i>
600	<i>Outfit and furnishing, generals</i>
700	<i>Armament group</i>
800	<i>Integration/Engineering</i>

Fuente: (DEPARTMENT OF DEFENSE USA, 2014)

Tabla 2 – ESWBS Functional Groups.

El ESWBS contiene niveles sucesivos de desclasificación que dividen cada grupo funcional principal en subgrupos principales (ESWBS Nivel II), sistemas (Nivel III) y límites del subsistema y componentes de equipos (Nivel IV y más bajo).

En la tabla 3 se muestra un ejemplo de desglose jerárquico del grupo 400 que comprende algunos sistemas y componentes del grupo funcional de comando y vigilancia de un buque de guerra.

<i>ESWBS indenture level</i>	<i>ESWBS number</i>	<i>ESWBS nomenclature</i>
Level I	400	<i>Command and surveillance, general</i>
Level II	440	<i>Exterior communications</i>
Level III	441	<i>Radio systems</i>
Level IV	4413	<i>T1322()/SRC communications transmitter</i>
Level V	44131	<i>AM-6675/URT Amplifier</i>

Fuente: (DEPARTMENT OF DEFENSE USA, 2014)

Tabla 3 – Ejemplo de Desglose Jerárquico

Con esta taxonomía que codifica cada uno de los sistemas y componentes de un buque de guerra y se adelantan actividades de vital importancia para el proyecto de construcción como el desarrollo del sistema logístico de adquisiciones y el diseño del plan de mantenimiento, y se registran especificaciones en el contrato de compra del buque, entre otras actividades. Pero lo más importante para el objetivo del presente trabajo es la construcción de un cronograma de trabajo que especifique los tiempos de fabricación, armado, ensamble, montaje y conexionado de cada uno de estos grupos constructivos, lo que permitirá obtener información codificada para ingresar al modelo (digital) de construcción naval a proponer.

4. Modelación discreta

En este documento se ha hecho referencia a que la estrategia de producción de un barco es una estrategia por proyecto debido, especialmente, a que son bienes producidos bajo pedido. Otra característica es que normalmente cada producto es único y, dado el tipo de trabajo, todos los esfuerzos se concentran en un proyecto a la vez, el cual siempre está asociado a una actividad intensiva en el uso de la mano de obra (EAE Business School, 2018). En este orden de ideas, se establece un evento discreto, pues se cumple directamente con el concepto en el cual los eventos (de producción) cambian el estado del sistema en instantes espaciados en el tiempo.

Para un mejor entendimiento, se puede decir que los modelos continuos se caracterizan por representar la evolución de las variables en forma continua, por lo que normalmente utilizan ecuaciones diferenciales para considerar los cambios de una característica o propiedad con respecto al tiempo, o derivadas parciales para representar cambios con respecto al espacio. De modo análogo, los modelos discretos representan variables en el tiempo en forma discreta, o sea, valores definidos en espacios de tiempo, por lo tanto, un evento se define como una acción instantánea que puede cambiar el estado del modelo (Guasch et al, 2003). Los elementos más significativos de los modelos discretos son:

Actividades: Tareas o acciones que ocurren en el sistema y se encapsulan entre dos eventos. En general, tienen duración y requieren recursos para su ejecución. Ej. Corte de lámina, arme de bloque, levantamiento del casco, montaje de *outfitting*.

Entidades: grupo de objetos que circulan o transitan a través del sistema. Pueden existir en un tiempo limitado o ser permanentes. Los temporales se procesan en el sistema como piezas, clientes y/o documentos y tienen atributos como precio, peso, prioridad o tamaño. En resumen, llegan se procesan y salen del sistema. Ej. Láminas de acero, bloques, perfiles, equipos propios del buque, etc.

Recursos o entidades permanentes: Son medios con los que se pueden desarrollar actividades. Pueden tener características como capacidad, velocidad y averías; pueden ser máquinas, equipos de transporte, personas, etc. Ej. Máquinas de corte, máquinas de soldar, grúas, pantógrafos, equipos humanos de fabricación o montaje.

5. Software de simulación

Para la selección un *software* apropiado para simulación de eventos discretos (DES) de un proceso de producción de construcción naval se puede proponer un método de Análisis de Decisión de Criterios Múltiples (MCDA) como lo plantean Jean David Caprace et al, de la Federal University of Rio de Janeiro (2011) en su publicación titulada “Discrete Event Production Simulation in Shipyard Workshops”. Existen en el mercado diferentes programas de simulación que pueden ser utilizados en la industria de la construcción naval. Algunos programas son mejores que otros dependiendo del contexto y madurez del diseño. El mejor escenario siempre será cuando existe suficiente información y datos del proyecto, en este caso todos los métodos y/o programas podrían ser usados. En cuanto al diseño de un modelo, podrían utilizarse diferentes métodos de estimación que al final proporcionan diferentes proyecciones del resultado de la simulación (Caprace et al, 2011). Sin embargo, para lograr el objetivo de modelación que se busca, se aspira a un proyecto existente, ya realizado, con tiempos, rendimientos, capacidad disponible, diseño, disposición del astillero (*layout*), con equipo de mano de obra validado y con resultados finales del proyecto medibles. En este sentido, se busca modelar un evento discreto y validar su efectividad con un ejemplo real.

Family	Criterion
Cost	Application fee
	Easy to learn
	Modern visualization
Usability	Graphical user interface
	Technical support
	Popularity
	Custom extensions
Performance	Technical capacity
	Modularity
	CAD connections
	Compatibility with other software
	Reuse of models and objects
	Pre- and post-processing of data
	Statistical analysis

Fuente: (Caprace et al, 2011)

Tabla 4 – Criterios de Evaluación para Selección de *Software*

Caprace et al (2011) proponen el desarrollo de un análisis de criterios múltiples (MCA), también llamado Toma de Decisiones de Criterios Múltiples (MCDM), método desarrollado para apoyar los problemas de toma de decisiones, formalizando las compensaciones entre las alternativas, y fomentar la transparencia de la decisión. Esta metodología demanda una adecuada selección de los criterios para conducir una decisión

racional, basándose en un análisis comparativo de alternativas tecnológicas, cuantificando la relevancia de los diferentes parámetros. Para la selección de un *software* apropiado (ver tabla 4) para simulación discreta (DES) de un proceso productivo de construcción naval, el documento plantea la siguiente estructura jerárquica de evaluación.

La tabla 5 es una adaptación de lo expuesto por Caprice et al (2011), la cual contiene catorce (14) criterios cualitativos reunidos en tres (03) familias. Se ha agregado una función de preferencia para cada criterio basado en la siguiente ponderación:

Muy bueno = 0.9, bueno = 0.7, promedio = 0.5, malo = 0.3, muy pobre = 0.1.

Esta propuesta considera la posibilidad de desarrollar una mejora en la selección de los criterios del modelo de producción, teniendo en cuenta que contempla tres (03) criterios adicionales, como se observa en la tabla 5: **i)** Oferta académica para aprendizaje, **ii)** Representación en el país (o ciudad) y **iii)** Capacidad de renderización del modelo de producción.

Familia	Criterio
Costo	Costo de aplicación
	Facilidad de aprendizaje
	Modelo de visualización
Usabilidad	Interfaz gráfica de usuario
	Soporte técnico
	Popularidad (juicio de expertos)
	Representación en el país (o ciudad)
	Oferta académica para aprendizaje
	Extensiones personalizadas
	Capacidad técnica
	Modularidad
	Interacción con CAD
	Rendimiento/desempeño
Reutilización de modelos y objetos	
Pre y posprocesamiento de datos	
Análisis estadístico	
Capacidad de renderización	

Tabla 5 – Criterios Propios de Evaluación para Selección de *Software*

En el mercado actual de *software* para modelación se puede encontrar entre otros:

- Arena (<http://www.arenasimulation.com/>).
- Flexim (<http://www.flexsim.com/>).
- Plant Simulation (<http://www.plm.automation.siemens.com/>).
- ProModel (<http://www.promodel.com/>).
- Dassault Systems (<http://www.3ds.com/>).

6. Bases de datos

Teniendo presente que el modelo a diseñar tiene la premisa de constituirse en un proceso de producción ya existente, es posible obtener los datos originados por información primaria y secundaria directamente de los resultados de la construcción naval ya realizada.

Con estas bases de datos, se debe tener la posibilidad de:

- Desarrollar las modelaciones matemáticas.
- Identificar distribuciones de probabilidad, especialmente para tiempos (t) entre eventos y del rendimiento de los procesos de producción.
- Identificar la dependencia entre eventos de producción.
- Cuantificar horas/hombre para cada actividad de producción.
- Conocer la secuencia de armado de bloques e instalación de *outfitting*.
- Identificar las variables externas e internas que afectan la construcción.

Para el caso de modelación del proceso de producción de un buque OPV 80 construido en COTECMAR, se cuenta con:

Bases de datos de producción reales:

- Corte de lámina.
- Corte de perfiles.
- Arme de previas y paneles.
- Ensamble de bloques.
- Secuencia de ensamble del casco.
- Fabricación y montaje de *outfitting* en caliente.
- Montaje de *outfitting* en frío.
- Fabricación e instalación de sistemas auxiliares.
- Listado de equipos.
- Estrategia constructiva.
- Indicadores de producción.

7. Conclusiones

Con base en lo expuesto en el presente documento, se pueden obtener conclusiones relacionadas con las condiciones que enmarcan el objetivo de realizar una modelación y simulación del proceso de construcción naval, tomando como referencia el caso colombiano de construcción de buques tipo OPV 80, para lograr la proyección de buques no construidos aún en Colombia, teniendo como consideraciones principales el uso de la capacidad disponible y la no afectación de los procesos logísticos sobre el proceso productivo.

El proceso de construcción naval está enmarcado en el tipo de producción por proceso o por pedido, por sus características, capacidades de proceso, tiempos de pedido y lógica de construcción.

La modelación de un proceso productivo existente, como es el caso de la OPV 80, permite conocer información para una validación del proceso, identificando secuencias, tiempos

y variables del mismo. De esta manera, se simularán otros procesos de construcción naval en COTECMAR.

Los astilleros dedicados a la construcción naval basados en las mejores prácticas de ingeniería, desarrollan la estrategia constructiva de cada embarcación y la optimizan con base en el aprendizaje y en los cambios logísticos y tecnológicos del entorno.

El ESWBS es una herramienta fundamental para la caracterización y taxonomía de un buque de guerra. Codifica en forma jerárquica grupos de construcción, sistemas, subsistemas, equipos y componentes, permitiendo una organizada planeación para la producción, para los procesos logísticos de adquisiciones y otras actividades como el mantenimiento.

Existe en el mercado una amplia oferta de programas (*software*) para implementar el modelado de una construcción naval. Para una selección adecuada, se sugiere la aplicación de un proceso de evaluación conocido como MCDM, el cual permite definir criterios de evaluación y valorar cuantitativamente el beneficio.

Referencias

- Caprace, J. D., Da Silva, C. T., Rigo, P., & Martin, C. (2011). Discrete Event Production Simulation and Optimisation of Ship Block Erection Process. 10th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, 271–282.
- COTECMAR. (1 de mayo de 2015). Estrategia Constructiva OPV III. Cartagena, Bolívar, Colombia: Dirección de Construcciones.
- DEPARTMENT OF DEFENSE USA. (2014). RELIABILITY CENTERED MANTENANCE (RCM) PROCESS MIL-STD 3034 A. Washington: Naval Sea Systems Command.
- Djačkov, V., Žapnickas, T., Čerka, J., Mickevičienė, R., Ašmontas, Ž., Norkevičius, L., ... Blanco-Davis, E. (2018). Numerical simulation of a research vessel's aftpart hull form. *Ocean Engineering*, 169(December 2017), 418–427. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.030>
- EAE Business School. (10 de Octubre de 2018). Retos en Supply Chain. Obtenido de EAE: <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/tipos-de-sistemas-de-produccion-industrial-y-sus-caracteristicas/>
- Garrett, R. K., & Mair, H. U. (1995). Navy Initiative to Enhance Structural Failure Simulation. *Computational Mechanics '95*, 1697–1702. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79654-8_276
- Guasch et al, A. (2003). Modelacion y Simulación, Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. Cataluña: Edicion UPC.
- Gwynne, S., Filippidis, L., Galea, E. R., Cooney, D., & Boxall, P. (2007). Data Collection in Support of the Modelling of Naval Vessels. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2005, 443–454. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47064-9_42

- Hadjina, M. (2009). Simulation Modelling Based Methodology for Shipbuilding Production Process Design *. *Strojarstvo*, 51(6), 547–553.
- Ju, S., Sung, S., Shen, H., Jeong, Y., & Gye, J. (2020). System development for establishing shipyard mid-term production plans using backward process-centric simulation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, 20–37. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.05.005>
- Kim, H., Lee, S. S., Park, J. H., & Lee, J. G. (2005). A model for a simulation-based shipbuilding system in a shipyard manufacturing process. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18(6), 427–441. <https://doi.org/10.1080/09511920500064789>
- König, M., Beißert, U., Steinhauer, D., & Bargstädt, H.-J. (2007). Constraint-based Simulation of Outfitting Processes in Shipbuilding and Civil Engineering. *Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation*. Retrieved from [http://202.154.59.182/ejournal/files/Constraint-based simulation of outfitting processes in shipbuilding and civil engineering.pdf%5Cnhttp://www.simofit.de/Paper_EUROSIM_2007_koenig_beissert_steinhauer_bargstaedt.pdf](http://202.154.59.182/ejournal/files/Constraint-based_simulation_of_outfitting_processes_in_shipbuilding_and_civil_engineering.pdf%5Cnhttp://www.simofit.de/Paper_EUROSIM_2007_koenig_beissert_steinhauer_bargstaedt.pdf)
- Krause, M., Roland, F., Steinhauer, D., & Heinemann, M. (2004). Discrete event simulation: An efficient tool to assist shipyard investment and production planning. *Journal of Ship Production*, 20(3), 176–182.
- Lee, K., Shin, J. G., & Ryu, C. (2009). Development of simulation-based production execution system in a shipyard: A case study for a panel block assembly shop. *Production Planning and Control*, 20(8), 750–768. <https://doi.org/10.1080/09537280903164128>
- Mansoori, M., & Fernandes, A. C. (2016). The interceptor hydrodynamic analysis for controlling the porpoising instability in high speed crafts. *Applied Ocean Research*, 57, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.02.006>
- OTAN. (2010). AAP-20. Bruselas: Nato Standarization Agency.
- Riola, J. M. et al (2019). Optimización del ciclo de vida en el buque de guerra: plan de mantenimiento y monitorización para la reducción de costes. VI International Ship Design & Naval Engineering Congress, Colombiamar, Cartagena de Indias.
- Shams, A., Dovizio, D., Zwijsen, K., Le Guennic, C., Saas, L., Le Tellier, R., ... Fichot, F. (2019). Computational fluid dynamics for in-vessel retention: Challenges and achievements. 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH 2019, 135, 5530.
- Song, Y. J., & Woo, J. H. (2013). New shipyard layout design for the preliminary phase & case study for the green field project. *Inter J Nav Archit Oc Engng*, 5(1), 132–146. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0122>
- Trubat, P., Molins, C., & Gironella, X. (2019). Wave hydrodynamic forces over mooring lines on Floating Offshore Wind Turbines. *Ocean Engineering*, (Accepted 11-Nov-2019), 106730. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106730>

US NAVY. (2016). NAVSEA ESWBS MANUAL 4790 1. US NAVY.

Wang, C., Mao, Y., Xiang, Z., & Zhou, Y. (2015). Ship Block Logistics Simulation Based on Discrete Event Simulation. *International Journal of Online Engineering (IJOE)*, 11(6), 16. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v11i6.4968>

Wang, S., Peng, X., Yang, S., Li, H., Zhang, J., Chen, L., & Chen, W. (2018). Numerical and experimental studies on decomposition and vent of di-tertbutyl peroxide in pressure vessel. *Process Safety and Environmental Protection*, 120, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.09.001>

Williams, D. L., Finke, D. E., & Traband, M. T. (2001). DISCRETE SIMULATION DEVELOPMENT FOR A PROPOSED SHIPYARD STEEL PROCESSING FACILITY. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*, 882–887. <https://doi.org/10.1109/WSC.2001.977367>

Ypma, E. L., & Turner, T. (2019). An approach to the validation of ship flooding simulation models. In *Fluid Mechanics and its Applications* (Vol. 119). https://doi.org/10.1007/978-3-030-00516-0_38