

La simulación en el diseño de los sistemas hidráulicos navales

Daniel Molina Pérez e-mail: danielmolina90@gmail.com
Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CIDNAV), Habana

Amadelis Quesada Torres e-mail: nurialeo89@gmail.com
Empresa de Proyectos e Investigaciones Hidráulicas de La Habana, Habana

Yohelvis A. Febles Martínez e-mail: cid5@reduim.cu
Centro de Investigación y Desarrollo Naval (CIDNAV), Habana

Lemuel C. Ramos Arzola e-mail: lemuelcarlosra@gmail.com
Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), Habana

RESUMEN

Los sistemas hidráulicos navales son redes de tuberías que intervienen en la mayoría de las funciones de una embarcación. Este trabajo desarrolla el diseño de un sistema de achique y contraincendios de un buque, para lo cual se emplea el software EPANET, con el objetivo de demostrar la factibilidad del diseño de sistemas hidráulicos navales basado en la simulación computacional. Se concluye que la simulación integrada al diseño de estas redes, permite configurar los sistemas de manera que las variables de flujo se encuentren dentro de los rangos recomendables y reglamentarios; posibilita la recreación de diferentes escenarios del sistema, así como el análisis de variantes y el diseño gradual; evita la selección de componentes sobredimensionados o erróneos, lo que viabiliza la optimización de pesos y costos de los sistemas.

Palabras clave: EPANET, simulación de sistemas navales, sistemas contraincendios en buques, sistemas de achique, sistemas de tuberías en buques.

The simulation in the design of hydraulic naval systems

ABSTRACT

Naval hydraulic systems are pipe networks which intervene in most of the functions of a ship. This paper describes the design of a bilge and fire protection system for a ship, which is simulated with the EPANET software, in order to demonstrate the feasibility of the design of marine hydraulic systems based on computer simulation. It is concluded that integrating simulation to the design of these networks allows to configure systems so that the flow variables are within the recommended ranges and regulations; enables recreation of different system scenarios as well as variants analysis and gradual design; prevents selection of oversized or erroneous components thus allowing optimization of weights and costs of the systems.

Keywords: EPANET, simulation of naval systems, fire protection systems on ships, bilge systems, piping systems on ships.

INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XX los sistemas de tuberías eran diseñados basados en reglas intuitivas y conservadoras. Los métodos analógicos llegaron a mediados del siglo XX, para ser sustituidos por la simulación computacional de sistemas hidráulicos que tiene su origen en 1957 (Walski 2006). Simular un sistema de tuberías - encontrar la distribución de caudales y presiones - puede significar encontrar la solución de cientos de ecuaciones no lineales simultáneamente, es decir, la solución de un sistema de ecuaciones no lineales.

Los sistemas hidráulicos navales son redes de tuberías que intervienen en la mayoría de las funciones de una embarcación y pueden llegar a representar una parte importante del costo y el peso total de un buque (Asmara 2013). Estas redes pueden conducir gas, combustible, aceite de lubricación y agua de enfriamiento para las máquinas. Para el confort humano existen sistemas de agua potable, vapor de agua y agua residual, entre otras. Para la protección y seguridad existen sistemas contraincendios, de achique y de lastre. Estos sistemas comprenden generalmente elementos como tuberías, tanques, válvulas, válvulas de control, accesorios, bombas, intercambiadores de calor, emisores, sensores, eyectores, actuadores, entre otros.

El diseño de los sistemas hidráulicos de una embarcación se produce de manera gradual, ganando en detalle y precisión a medida que avanzan las etapas del proyecto. Esto se debe, en parte, a que el especialista en un inicio, no tiene toda la información requerida que permite la simulación de la red. Por otro lado, el diseño gradual está orientado a garantizar los rangos recomendables de las variables de flujo (caudal y presión), al cumplimiento con las reglas de las sociedades clasificadoras de buques, a disminuir los costos y pesos de los sistemas, a establecer mejores distribuciones de los mismos, entre otras (Asmara 2013). De manera que el diseño de un sistema hidráulico naval requiere de múltiples modificaciones y simulaciones, por lo que se hace necesario resolver varias veces el conjunto de ecuaciones gobernantes. Por tales motivos los sistemas hidráulicos navales se encuentran entre los elementos más complejos de diseñar de una embarcación (Cassee 1992).

EPANET es un programa computacional de análisis de sistemas de distribución de agua. Aunque en general puede ser utilizado para el análisis de cualquier fluido no compresible con flujo a presión. El programa permite realizar análisis hidráulicos de redes de tuberías a partir de las características de los elementos que componen el sistema, para obtener la presión y los caudales en nodos y tuberías respectivamente (Rossman 2001). En este trabajo se aplica la simulación computacional, mediante EPANET, al diseño del sistema de achique (SA) y el sistema contraincendios (SCI) de un remolcador de puerto. Por medio de este caso real se demuestra la factibilidad del diseño de sistemas hidráulicos navales basado en la simulación computacional.

SISTEMAS DE ACHIQUE

Los SA's constituyen un sistema de seguridad de las embarcaciones. Estos sistemas deben lograr bombear y agotar el agua de cualquier compartimento estanco que no esté dedicado de manera permanente a contener agua, combustible, aceite o cualquier otro tipo de líquido. El agua a extraer puede entrar en el interior del buque por diversas causas como golpes de mar, fugas en los sistemas de tuberías, averías, entre otras.

SISTEMAS CONTRA INCENDIOS

Los SCI's son sistemas esenciales para la extinción de incendios en embarcaciones. Estos sistemas de seguridad bombean agua salada hacia diferentes puntos del buque donde se pueden encontrar lanzas contraincendios, boquillas, aspersores, entre otros. Los SCI's por agua, son muy efectivos por su capacidad de enfriamiento, evitando así explosiones de materiales combustibles y mitigando la propagación del fuego.

REGISTRO CUBANO DE BUQUES

El Registro Cubano de Buques, RCB (2006), es una sociedad clasificadora formada por una organización independiente de expertos técnicos.

Presenta un conjunto de reglas aplicables a todas las partes o elementos que conforman una embarcación. Estas reglas atienden al estado actual del conocimiento relacionado con la industria naval y se aplican, por parte del registro, en la clasificación y supervisión técnica de las embarcaciones.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL REMOLCADOR RAD II

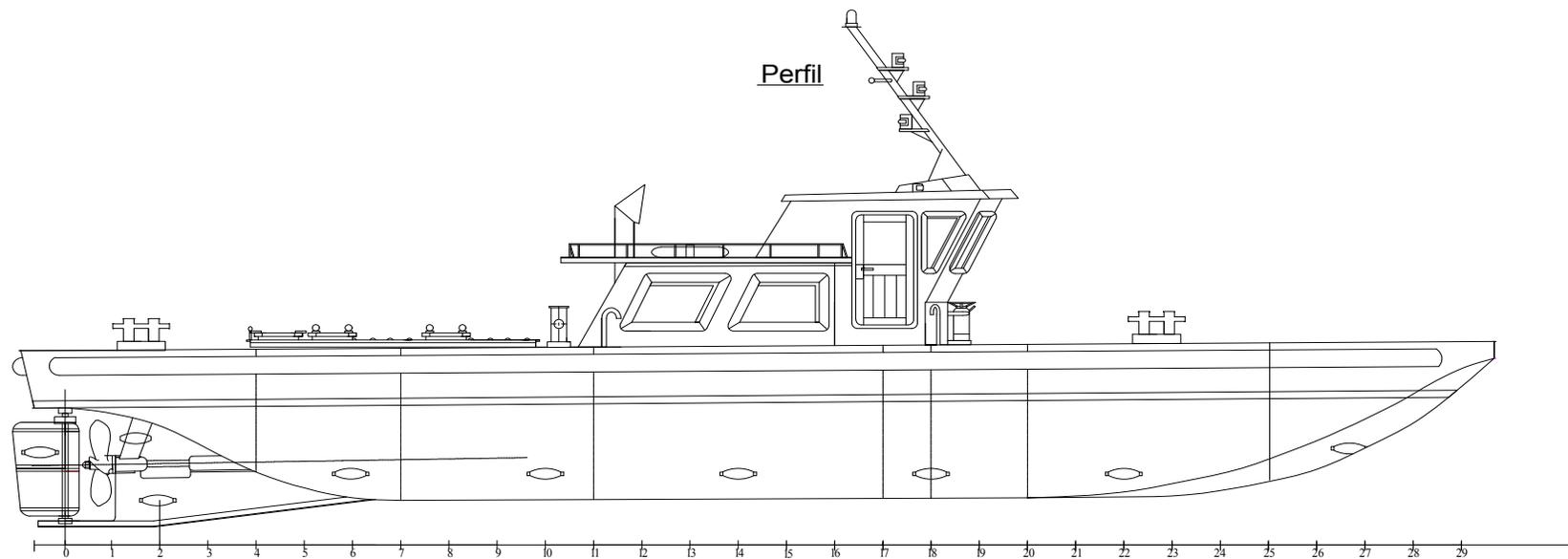
El RAD II es un barco remolcador de puerto con casco y caseta de acero. Cuenta con una sola cubierta y cinco compartimentos estancos, véase figura 1. En la tabla 1 se muestran las características generales de esta embarcación.

Tabla 1. Características generales del RAD RII

Eslora total	15,48 metros
Eslora de flotación	11,00 metros
Manga de trazado	4,60 metros
Puntal de diseño (a máxima carga)	1,75 metros
Calado	1,40 metros
Desplazamiento máximo	58,40 toneladas
Velocidad máxima	8,00 nudos
Máquinas principales	2x148 kW
Categoría según el área de navegación	III interior de puerto

REGLAS DEL RCB

A continuación se enumeran algunas de las reglas del RCB (2006) aplicadas al diseño del SA y el SCI, cuyo cumplimiento constituye, en buena parte, la esencia del posterior diseño. Se han omitido algunas reglas que por su extensión pudieran desviar la atención de los principales aspectos del trabajo.



Planta

Arriba: sobre cubierta. De abajo: bajo cubierta.

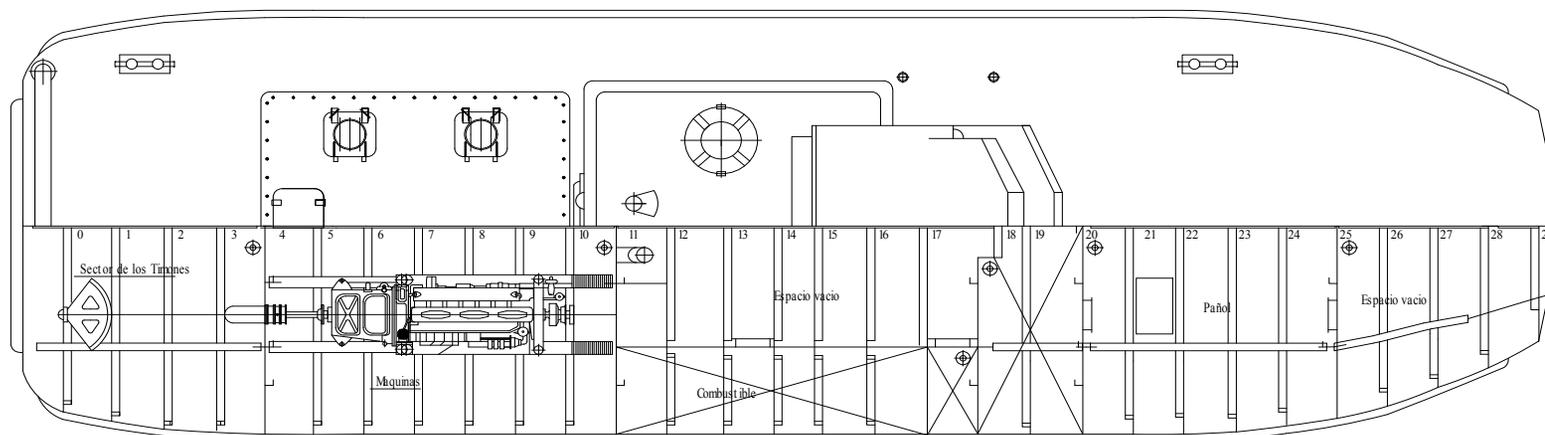


Figura 1. Plano de disposición del remolcador RAD II

Reglas del RCB aplicadas al diseño del sistema de achique del RAD II

1. Cada buque autopropulsado deberá tener no menos de dos bombas de achique con accionamiento mecánico.
2. En buques de áreas restringidas de navegación II y III, así como en otros buques de hasta 25 m de eslora, una de las bombas de achique podrá ser accionada por el motor principal y la otra podrá ser un eyector o una bomba manual.
3. Cada bomba de achique requerida deberá tener una capacidad tal que, en la magistral principal de achique, cuyo diámetro se calcula por la ecuación (1), en condiciones normales de explotación, la velocidad de circulación no sea menor de 2 m/s.

$$d_1 = 1,68\sqrt{L(B + D)} + 25 \quad (1)$$

donde: L, B, D : eslora, manga y puntal respectivamente, en metros;
 d_1 : diámetro, en milímetros.

4. Para los diámetros de los ramales de succión la fórmula es la siguiente:

$$d_0 = 2,15\sqrt{l(B + D)} + 25 \quad (2)$$

donde: l : espacio achicado (longitud de compartimentos achicados), en metros;
 d_0 : diámetro, en milímetros.

5. Los pianos de distribución y los ramales (para que no se comunique agua de un compartimento a otro) deberán estar provistos de válvulas de cierre y de retención.
6. En las succiones del achique de compartimentos fuera de los espacios de máquinas y túneles se instalan rejillas con agujeros no mayores de 10 mm de diámetro. El área total de estos agujeros debe ser como mínimo dos veces mayor que el área de la sección transversal de la succión.

Reglas del RCB aplicadas al diseño del sistema contraincendios del RAD II

1. Para buques con arqueo bruto menor que 300 TRB (toneladas de registro bruto) se requiere como mínimo de una bomba contraincendios que produzca una carga de presión mínima de 0,2 MPa en las bocas contraincendios, con estas funcionando simultáneamente.
2. La capacidad total de las bombas estacionarias contraincendios, exceptuando la de emergencia (en caso de haberla) con una presión en cualquier toma contraincendios no menor que la señalada en la regla 1, deberá garantizar un caudal de agua con pitones manuales contraincendios no menor que el determinado por la ecuación (3).

$$Q = CP * m^2 \quad (3)$$

donde: Q : Caudal en m³/h; CP : coeficiente adimensional que depende del índice de compartimentación del barco, para el RAD II: $CP=0,008$;
 m viene dado por la ecuación (4):

$$m = 1,68\sqrt{L_2(B + D)} + 25 \quad (4)$$

donde: L_2 : longitud de compartimentos salvo aquellos sin materiales inflamables, en metros.

3. Cada bomba estacionaria contraincendios deberá calcularse para dos chorros de agua como mínimo, con el mayor diámetro de boquillas de los pitones tomados para el buque en cuestión.
4. La ubicación de las tomas contraincendios deberá permitir la unión fácil y rápida de las mangueras contraincendios y su cantidad deberá garantizar el suministro de dos chorros de agua hacia cualquier lugar de cada espacio, cubierta o bodega vacía.
5. Las mangueras contraincendios deberán cumplir las siguientes prescripciones: (i) tener una longitud entre 15 y 20 m a partir de las tomas contraincendios, ubicadas sobre las cubiertas de intemperie, y aproximadamente 15 m a partir de las tomas contraincendios en los espacios y (ii) las mangueras conjuntamente con los pitones deberán encontrarse situadas junto a las tomas contraincendios en carretes o colocadas dentro de cajas especiales.
6. En los buques con arqueo bruto inferior a 150 TRD, se permitirá utilizar boquillas de 10, 12, 16 y 19 mm de diámetro. En los espacios de máquinas y en las cubiertas de intemperie, las boquillas de los pitones deberán garantizar la mayor descarga posible desde dos chorros, con una presión por cada toma de 0,2 MPa desde la bomba estacionaria de menor capacidad.

DISEÑO DEL SISTEMA DE ACHIQUE Y EL DE CONTRAINCENDIOS DEL RAD II

Teniendo en cuenta el confinado espacio del cuarto de máquinas se concibe que una misma bomba pueda prestar servicio a ambos sistemas, achique y contraincendios. Para esto debe ser instalada una válvula de tres vías, que en una posición conecte la succión de la bomba a la magistral de achique y en otra conecte la succión de la bomba con las cajas de agua, ver figura 2. En el lado de la descarga de la bomba, de manera similar, se ejecutará la operación de abrir las válvulas a la banda cuando se achique o las válvulas del SCI cuando se requiera de este.

El sistema de achique constará de un ramal de succión ubicado en la crujía de cada compartimento, en la figura 2 se identifica el ramal del pañol con carácter ilustrativo. Cada ramal estará conectado a la magistral de achique, la cual se conecta con la succión de la bomba. La bomba de servicio será de accionamiento eléctrico. Para casos de emergencia, se contará con una bomba manual acoplada al sistema. Las bombas tendrán una descarga libre al mar y una toma que descargará en puerto aguas oleaginosas que no puedan ser vertidas al mar.

En la tabla 2 se muestran los diámetros de la magistral y los ramales de achique resultantes de las reglas del RCB.

Tabla 2. Diámetros del sistema de achique

Componente	Longitud (m)	d ₀ calculado(mm)	d ₀ seleccionado (mm)
Magistral de achique	1,50	42	40
Ramal de cuarto de timones	2,40	33	40
Ramal de cuarto de máquinas	3,48	35	40
Ramal de camarote	2,90	34	40
Ramal de pañol	4,00	36	40
Ramal de cuarto de proa	2,40	33	40

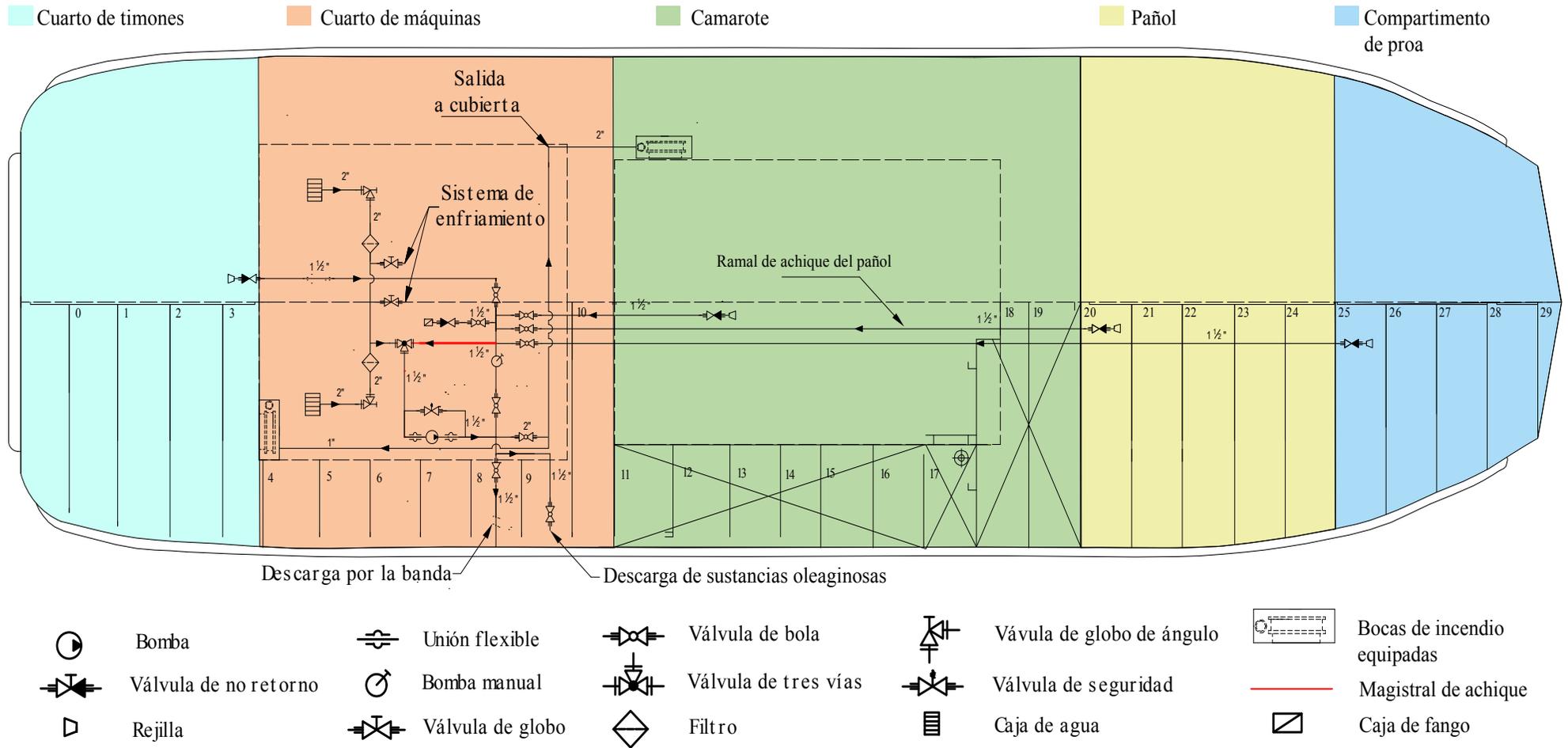


Figura 2. Esquema de principio del SA y SCI del remolcador RAD II

Por otro lado, el SCI succionará agua salada de las cajas de agua de la embarcación. En esa ocasión la bomba llevará el agua de dichas tomas hacia dos bocas de incendio equipadas (BIE), con el fin de garantizar dos chorros de agua a cada lugar del buque. Las BIE consisten en un armario que porta una manguera, una boquilla, y una válvula de cierre (véase la figura 3).



Figura 3. Bocas de incendio equipadas

La embarcación será provista de dos BIE, una con manguera de 25 mm semirrígida y boquilla de 10 mm será instalada en el cuarto de máquinas y otra con manguera plana de 45 mm y boquilla de 10 mm en el exterior de la caseta. El sistema deberá contar además con una válvula limitadora de presión como elemento de seguridad. Esto se debe a que el SCI no funciona con un caudal fijo, y en los casos en que se cierran las tomas contraincendios, la válvula limitadora evitará que la bomba opere en carga de corte.

Según las reglas del RCB, la bomba de achique debe operar con un caudal que garantice como mínimo la velocidad de 2 m/s en la magistral. El caudal que la garantiza es de $9 \text{ m}^3/\text{h}$.

Por otro lado, el SCI debe cumplir con criterios de caudal y presión. En las bocas de incendio debe existir como mínimo la presión de $0,2 \text{ MPa} \approx 20 \text{ m}$, mientras que la bomba, según ecuación (3), debe operar como mínimo con el caudal resultante de $12 \text{ m}^3/\text{h}$.

Como se aprecia, se trata de una bomba que debe tener un punto de operación para cada sistema. Para garantizar que ambos sistemas operen de acuerdo con las reglas, se desarrollará un modelo en EPANET que simule su comportamiento. Para ello, primeramente deben ser seleccionados todos los elementos del sistema y determinadas sus características hidrodinámicas.

La bomba seleccionada es ITUR serie AU-1,5/10 117 modificada a 3600 rpm. Las curvas caudal vs carga de presión (Q vs H) y caudal vs carga de succión neta positiva (Q vs NPSH) para esta velocidad de rotación (figura 4) fueron determinadas mediante las leyes de afinidad de bombas centrífugas.

Como es usual, los accesorios (válvulas, codos, filtros, cajas de fango, entre otros) son introducidos al modelo mediante coeficientes que relacionan las pérdidas de carga con la carga a velocidad para cada accesorio, denotados por K_{acc} . Por otro lado, los elementos que constituyen emisores, como son, en este caso, las boquillas de incendio y la descarga libre a la banda, se simulan en EPANET mediante coeficientes de descarga.

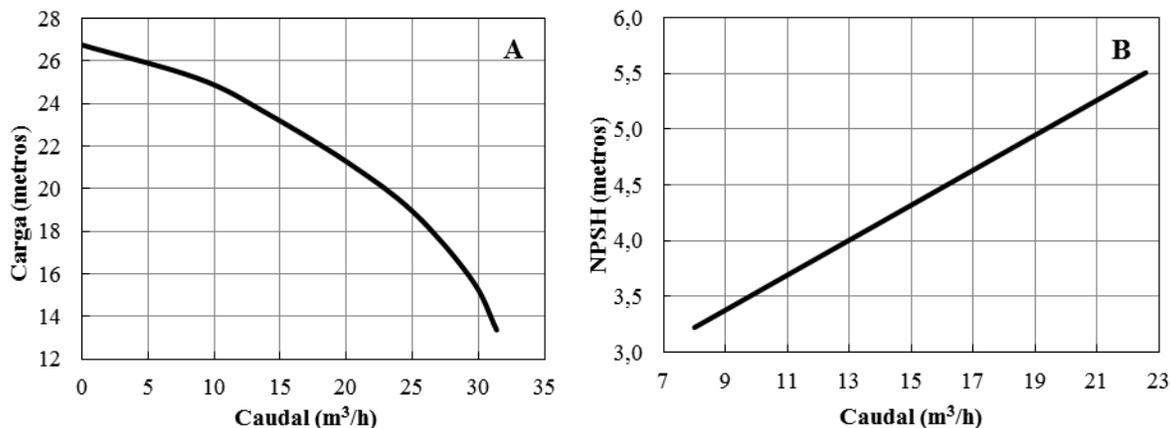


Figura 4. Curva carga vs caudal (A) y curva NPSH vs caudal (B) de la bomba ITUR

Estos coeficientes relacionan la presión que llega al emisor con el caudal que descarga el mismo, ver ecuación (5). Por tanto, el caudal de descarga depende de la presión que llegue al emisor. Por lo que se puede concluir que en estos sistemas no se conocen las demandas que entran y salen de la red, constituyendo variables a determinar. Resolver un sistema con las demandas como incógnitas adicionales es posible por las ecuaciones que aportan los elementos emisores, donde se relaciona el caudal y la presión mediante el coeficiente de descarga.

Estos sistemas son conocidos como “modelos comandados por presión” (en inglés, “pressure driven models”) (Elhay et al. 2015); (Todini 2003). EPANET ha sido ampliamente utilizado en modelos de este tipo, Cabrera y Alomá (2015) desarrollaron un modelo en EPANET con múltiples escenarios de decenas de rociadores, funcionando conjuntamente, para la protección contra incendios en la industria petrolera.

Las normas EN 671-1 (2001) y EN 671-2 (2001) están dirigidas a la construcción de las boquillas contra incendios. Estas normas regulan el caudal que debe existir para diferentes presiones en las boquillas, es decir que establecen los coeficientes de flujo con los que deben cumplir las boquillas. En la tabla 3 y tabla 4 se muestra un fragmento de la relación de estos coeficientes, los cuales relacionan el caudal y la presión mediante la ecuación (5).

$$Q = K\sqrt{10 * P} \quad (5)$$

donde: K : coeficiente de descarga en L/min/MPa^{0,5}; Q : caudal de descarga en L/min;
 P : presión que llega al emisor en MPa.

Tabla 3. Caudal y K mínimos en BIE de 25 mm (Fuente UNE 671-12001)

Diámetro del orificio de la boquilla (mm)	Caudal Q en L/min a la presión:			Coeficiente K (L/min/MPa ^{0,5})
	0,2 MPa	0,4 MPa	0,6 MPa	
10	59	84	102	42
12	90	128	156	64

Tabla 4. Caudal y K mínimos en BIE de 45 mm (Fuente UNE 671-22001)

Diámetro del orificio de la boquilla (mm)	Caudal Q en L/min a la presión:			Coeficiente K (L/min/(MPa) ^{0,5})
	0,2 MPa	0,4 MPa	0,6 MPa	
10	78	110	135	55
12	100	140	171	72
13	120	170	208	85

De igual manera, la descarga a la banda del SA debe ser simulada como un emisor. Esta descarga consiste sencillamente en una tubería abierta a la atmósfera, por lo que no cuenta con un accesorio con coeficiente de descarga definido. Sin embargo, este coeficiente puede obtenerse de la ecuación de pérdida de carga en accesorios, ver ecuación (6). Por ser la presión cero cuando el flujo sale a la atmósfera, la variación de presión corresponde a la presión aguas arriba de la descarga, resultando la ecuación (7), en la cual se despeja el caudal y queda definido el coeficiente de descarga K , ver ecuaciones (8), (9) y (10).

No obstante, el coeficiente de la norma relaciona la presión en MPa con el caudal en L/min, y en la ecuación (10) este coeficiente relaciona la presión en forma de carga, en metros columna de agua, con el caudal en m^3/s , por tanto hay que convertir el coeficiente de la norma de $L/min/MPa^{0.5}$ a $m^3/s/m^{0.5}$. Además de la particularidad de la ecuación (5) de presentar $10^{0.5}$ que debe ser multiplicado con el coeficiente K , pues EPANET trabaja con la ecuación tipo (10).

$$hf = \frac{\Delta P}{\gamma} = K_{acc} \frac{V^2}{2g} \quad (6) \quad \therefore \quad \frac{P}{\gamma} = K_{acc} \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{\frac{A^2 2g}{K_{acc}}} \times \sqrt{\frac{P}{\gamma}} \quad (8) \quad \therefore \quad K = \sqrt{\frac{A^2 2g}{K_{acc}}} \quad (9) \quad \therefore \quad Q = K \times \sqrt{\frac{P}{\gamma}} \quad (10)$$

donde: g : aceleración de la gravedad en m/s^2 ; γ : peso específico en N/m^3 ;
 A : área de la sección en m^2 ; $K_{acc}=1$ (para descarga libre).

RESULTADOS

En la figura 5A se muestran los resultados de la simulación del SCI descargando por boquillas de 10 mm. Véase que, a pesar de que a las bocas llegan presiones mayores que 20 m, el caudal en la magistral de incendios ($8,31 m^3/h$) es menor que el requerido por el RCB ($12 m^3/h$). Por lo que se realizan las siguientes modificaciones: (i) modificar el diámetro de la magistral de achique y contraincendios a 50 mm; (ii) modificar el diámetro de las tuberías conectadas a la succión y descarga de la bomba a 50 mm; (iii) modificar el diámetro de la tubería conectada a la boca de incendio equipada del cuarto de máquinas a 50 mm; (iv) sustituir el diámetro de las boquillas a 12 mm y 13 mm en el cuarto de máquinas y en el exterior de la caseta respectivamente. El nuevo sistema resulta como se muestra en la figura 5B. En esta ocasión se cumple con los requisitos tanto de presión en las bocas (21,78 m y 20,06 m) como de caudal en la magistral ($12,38 m^3/h$).

En el SA se simula el achique de cada compartimento independiente, de manera que resultan 5 escenarios, uno por cada compartimento. En la figura 6 se muestra la simulación del achique del compartimento de proa, que corresponde al ramal más crítico por tener mayor resistencia al flujo. Véase que cumple con su requisito de velocidad mínima en la magistral de 2 m/s alcanzando una velocidad de 2,4 m/s. Sin embargo la presión en la succión de la bomba indica, sin necesidad de analizar la NPSH, que en la bomba ocurre cavitación, pues el valor se encuentra incluso por debajo del cero absoluto de presión. Esta presión, aunque es imposible en la realidad, es la que resuelve el sistema, y esto se debe a que el sistema tiene gran parte de su diseño en la succión de la bomba, mientras que en la descarga no existe prácticamente resistencia, lo que

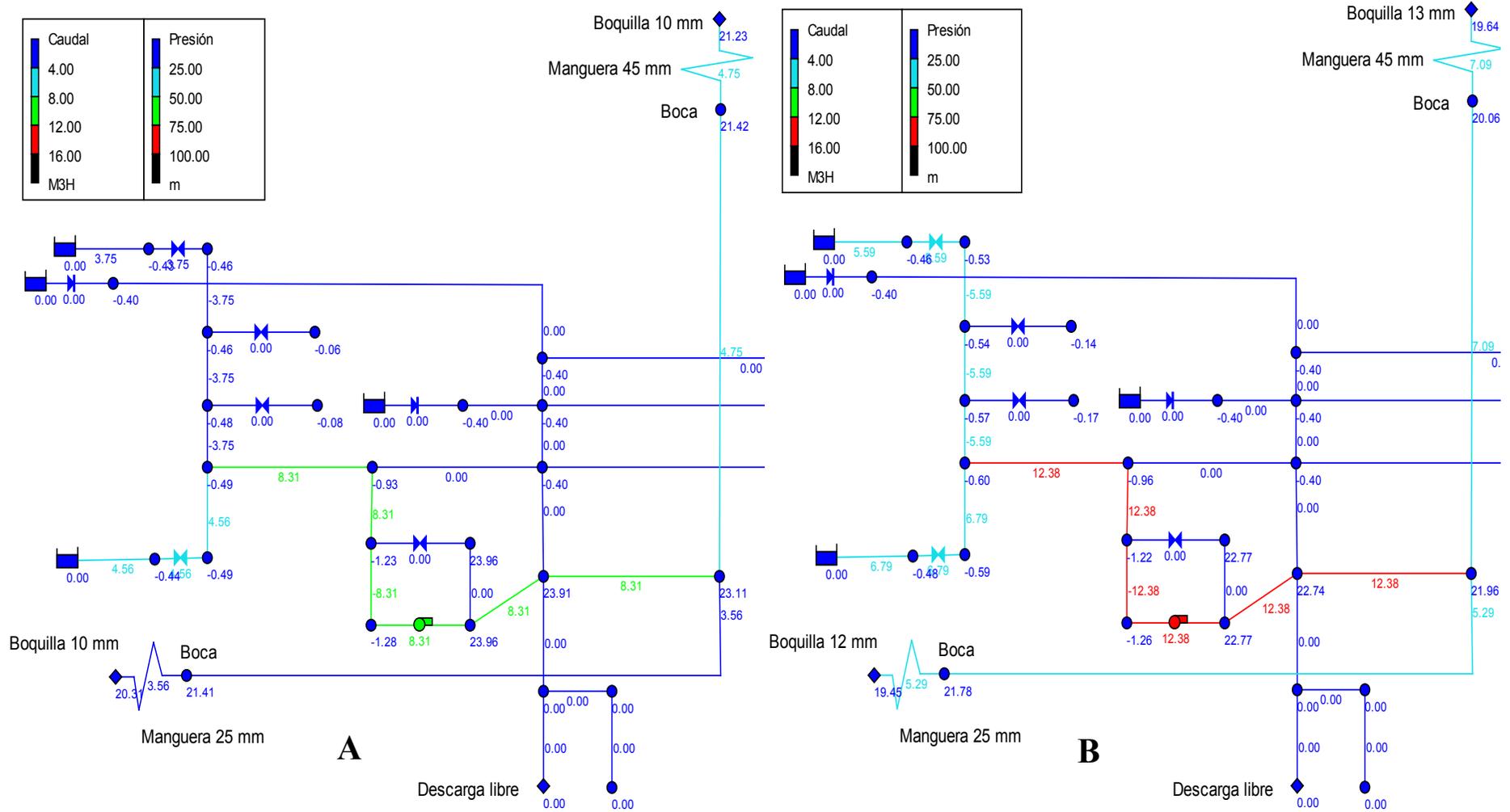


Figura 5. Resultados de la simulación del SCI: (A) SCI deficiente, (B) SCI modificado (punto como separador decimal)

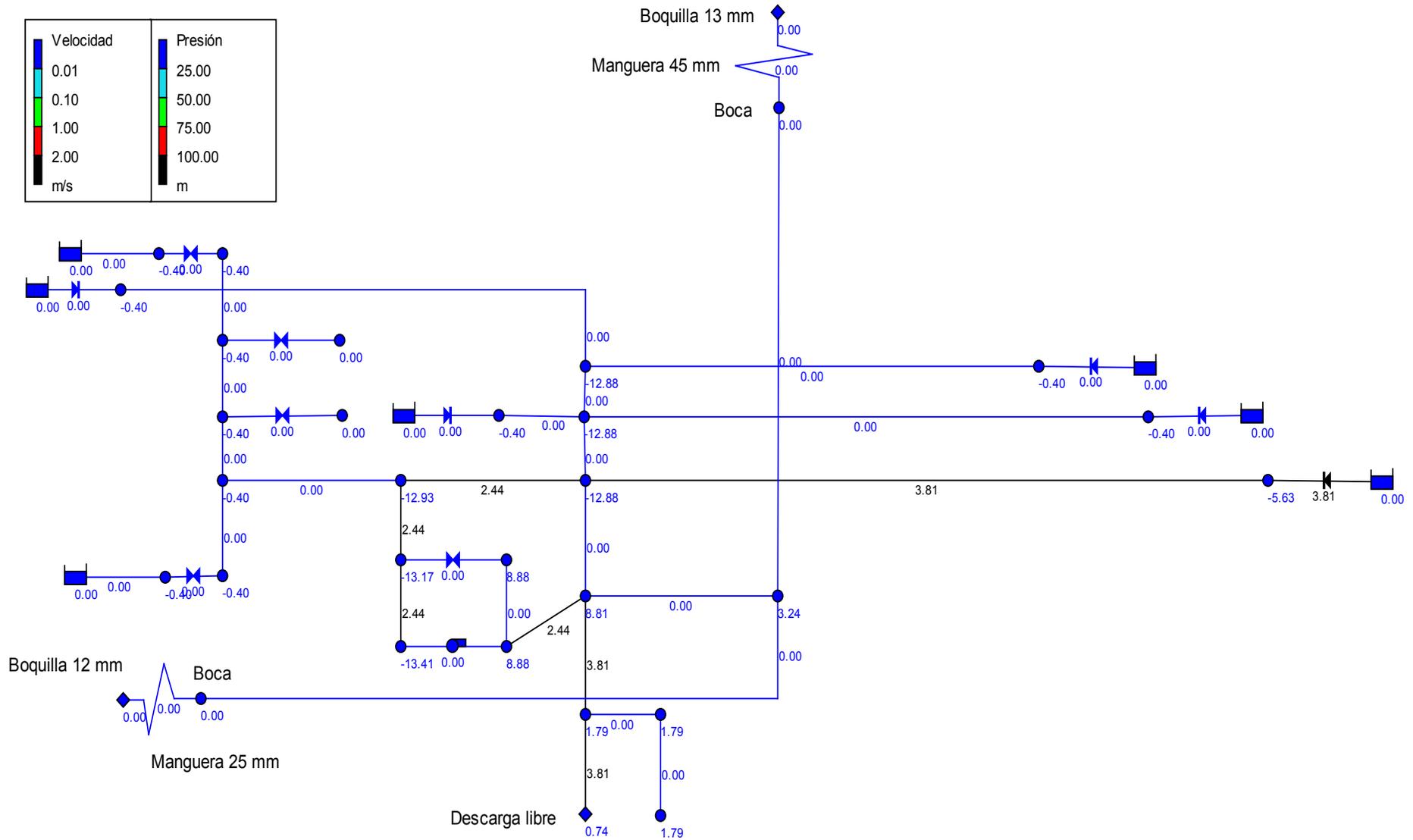


Figura 6. Resultados de la simulación del achique del compartimento de proa (punto como separador decimal)

provoca un gradiente hidráulico inadmisibles. En la simulación de los restantes compartimentos la NPSH disponible (NPSHd) se encuentra por debajo de la NPSH requerida (NPSHr), por tanto se realizan las siguientes modificaciones: (i) modificar el diámetro del ramal de proa a 65 mm y el resto los ramales a 50 mm de diámetro; (ii) colocar en la descarga de achique una válvula de compuerta de 40 mm de diámetro.

A pesar de los aumentos de diámetro, la NPSHd continúa siendo inferior a la requerida para todos los escenarios. Por lo cual se coloca una válvula de compuerta en la descarga de la bomba con el fin de regular el caudal. Esta válvula se regula a una apertura parcial del 25% para un $K_{acc}=20$. Los resultados de la NPSHd tras estas modificaciones se muestran en la figura 7, véase que esta vez la NPSHd es superior a la requerida con más de un metro de reserva. Nótese en la figura 7, que la razón por la que el ramal de proa se lleva a 65 mm es por la poca reserva que existe entre la NPSHd y la requerida para un diámetro de 50 mm (punto con marcador cuadrado).

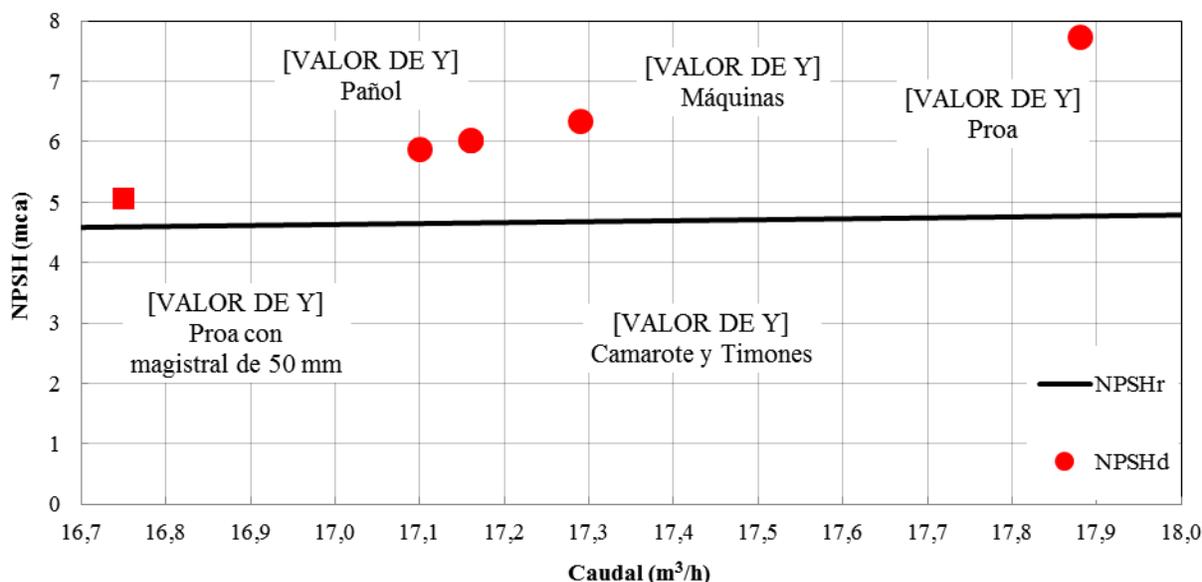


Figura 7. NPSH de la succión de la bomba para cada escenario de achique

En la figura 8 se muestra la simulación del ramal de proa tras las modificaciones descritas. De igual modo se cumple con la velocidad mínima en la magistral (2 m/s) para cada escenario, tal como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Caudal y velocidad en la magistral de achique para cada escenario

Parámetro	Cuarto de timones	Cuarto de máquinas	Camarote	Pañol	Compartimento de proa
Caudal (m³/h)	17,16	17,29	17,16	17,10	17,88
Velocidad (m/s)	2,43	2,45	2,43	2,42	2,53

Por último, el sistema cuenta con una bomba de 30 kg, 53m de tuberías y 54 accesorios que corresponden a un peso de 230 kg, para un total de 260 kg. La selección del equipamiento fue regida por la simulación, lo que permite cumplir con las reglas, comprometiendo pesos y dimensiones en la menor medida posible.

CONCLUSIONES

- Este trabajo demuestra que la simulación integrada al proceso de diseño de sistemas hidráulicos navales, permite configurar los sistemas de manera que las variables de flujo se encuentren dentro de los rangos recomendables y reglamentarios.
- Por otro lado, evidencia cómo la simulación computacional hace viable la recreación de diferentes escenarios del sistema, posibilita el análisis de variantes y el característico diseño gradual de los sistemas hidráulicos navales.
- Se evidencia que la posibilidad de simular la mayoría de los elementos del sistema, permite evaluar la factibilidad de cada uno y evita la selección de componentes sobredimensionados o erróneos. Hecho que posibilita la optimización de pesos y costos de los sistemas.

REFERENCIAS

- Asmara A.** (2013). "Pipe routing framework for detailed ship desing", Ed. Association for Studies and Student Interest in Delft (VSSD), ISBN: 97890-6562-326-3, Delft.
- Cabrera E. y Alomá A.** (2015). "Sistemas contra incendios para industria petrolera. Parte 3. Modelo detallado de red", Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol.36, No. 3, pp. 33-47, ISSN 1815-591X, CIH, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Cassee H. J.** (1992). "Piping systems", in Marine engineering, pp. 782-845, ISBN: 9780939773107, Ed. Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey.
- Elhay S.; Piller O.; Deuerlein J. and Simpson A. R.** (2015). "A robust, rapidly convergent method that solves the water distribution equations for pressure-dependent models", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol.142, No. 2, pp. 1-11, ISSN: 1943-5452, American Society of Civil Engineers (ASCE), Adelaide.
- EN 671-1.** (2001). "Instalaciones fijas de sistemas contraincendios. Sistemas equipados con mangueras. Parte 1: Bocas de incendio equipadas con mangueras semirrígidas", Asociación Española de Normalización y Certificación, España.
- EN 671-2.** (2001). "Instalaciones fijas de sistemas contraincendios. Sistemas equipados con mangueras. Parte 2: Bocas de incendio equipadas con mangueras planas", Asociación Española de Normalización y Certificación, España.
- Rossmann L. A.** (2001). "EPANET manual de usuario". U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- RCB** (2006). "Reglas para la clasificación y la construcción de los buques marítimos". Sociedad Clasificadora, Ministerio de Transporte (MITRANS), La Habana.
- Todini E.** (2003). "A more realistic approach to the extended period simulation of water distribution networks" in Advances in water supply management, pp. 173-183, ISBN: 978-90-5809-608-1, Ed. Taylor & Francis, London.
- Walski T. M.** (2006). "A history of water distribution". Journal-American Water Works Association, Vol. 98, No. 3, pp. 110-121, ISSN: 0003-150X, American Water Works Association, Denver, USA.