

## IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

### ANÁLISIS Y CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DE RUGOSIDAD EN TUBERÍAS DE CAPTACIÓN CON CRECIMIENTO MARINO

FRANCISCO SOTO SIMPSON <sup>1</sup>  
ROLANDO GARCÍA GILARDINO <sup>2</sup>

#### 1. RESUMEN

El uso de agua de mar para la industria de energía y más recientemente para la producción de agua desalinizada requiere de un diseño hidráulico apropiado de los sistemas de captación, siendo uno de sus principales criterios de diseño, la definición de parámetros de rugosidad por crecimiento marino al interior de tuberías.

El crecimiento marino o *biofouling* es el proceso natural a través del cual diferentes organismos se adhieren y colonizan superficies sólidas expuestas al ambiente acuático-marino. Es un fenómeno particularmente sensible en tuberías que transportan agua de mar, cuya capacidad puede verse comprometida producto de la reducción de diámetro y rugosidad asociada al crecimiento marino. Esto genera un aumento de pérdida de carga hidráulica, que puede afectar procesos aguas adelante o incluso restringir el caudal de operación, limitando así la capacidad productiva.

Pese a su gran relevancia, las referencias basadas en experiencias prácticas para establecer estos parámetros de diseño son limitadas. En este trabajo se presenta el análisis y calibración de los parámetros de rugosidad y espesor de crecimiento marino al interior de una tubería de captación ubicada en la zona central de Chile, basado en registros simultáneos de caudal y elevación de agua en la sentina. El nivel de crecimiento marino presente en este sistema limita su capacidad e impone restricciones para su funcionamiento. La discusión se orienta a cuantificar los hallazgos e impactos del fenómeno.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Asistente, PRDW Consulting Port and Coastal Engineers, [fsoto@prdw.com](mailto:fsoto@prdw.com)

<sup>2</sup>Ingeniero Principal, PRDW Consulting Port and Coastal Engineers, [rgarcia@prdw.com](mailto:rgarcia@prdw.com)

## 1. INTRODUCCIÓN

*Biofouling* o crecimiento marino es la acumulación indeseada de depósitos de partículas orgánicas e inorgánicas, micro- y macroorganismos sobre superficies. De acuerdo con la literatura especializada (e.g. Polman et al., 2020), los sistemas de captación de agua de mar ofrecen condiciones óptimas para la generación de biota marina: flujo continuo de agua oxigenada y rica en nutrientes, y ausencia de depredadores, entre otras.

Su aparición en infraestructura industrial, en particular en los rubros de la energía y desalinización, es la causa de múltiples inconvenientes relacionados con costos de operación y mantención, seguridad operacional y calidad del producto (Fernandes et al., 2021).

Existen diferentes alternativas para el control del crecimiento marino. Según Hopkins et al. (2021), la remoción mecánica es el método más comúnmente utilizado. Sin embargo, su aplicación es reactiva y puede suponer riesgos a la salud y seguridad cuando se ejecuta por personas, además de ser costoso a gran escala.

También se distinguen otros métodos mecánicos de limpieza como el uso de PIGs (Pipeline Inspection Gauge). Sin embargo, estos requieren infraestructura complementaria para su uso y su efectividad varía en función del nivel de incrustación alcanzado al interior de la tubería.

Por otra parte, también destacan métodos de carácter preventivo, como la aplicación de biocidas, e.g., hipoclorito de sodio. Si bien es un enfoque más atractivo para la operación de estos sistemas, en ocasiones su eficacia se ve afectada, requiriendo pruebas y ajustes en su dosificación para asegurar su efecto en el largo plazo.

Independiente de cual sea el método de remoción de crecimiento marino de preferencia para cada proyecto, su impacto sobre la capacidad de la infraestructura de captación debe ser considerado desde etapas tempranas. En términos estrictamente hidráulicos, el crecimiento marino al interior de tuberías de captación de agua de mar reduce su sección y aumenta la resistencia al flujo a través de su rugosidad.

En este trabajo se presenta el análisis y calibración de los parámetros de rugosidad y espesor de crecimiento marino al interior de una tubería de captación operativa desde al menos una década en la costa de la zona central de Chile. La discusión se orienta a cuantificar los hallazgos e impactos del fenómeno.

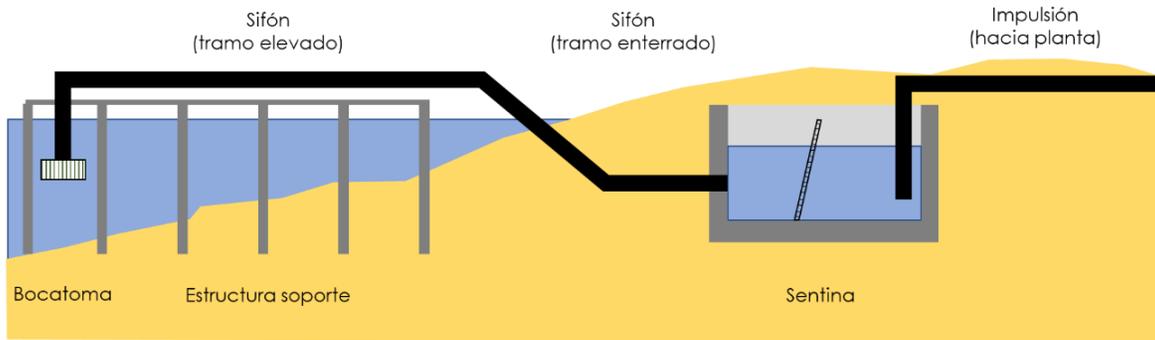
En la sección §2 se describe el sistema de captación en estudio, y en §3 se presentan las observaciones de campo utilizadas en el análisis hidráulico descrito en §4. En la quinta sección §5 se presentan los resultados del proceso de calibración, y en §6 son discutidos. Por último, en §7 se entregan las conclusiones.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN ANALIZADO

El sistema de captación en estudio se presenta esquemáticamente en la Figura 1. Este corresponde a un sifón hidráulico, a través del que se fuerza el flujo desde mar a tierra gracias al gradiente de presión que induce el descenso del nivel en la sentina, dado por la operación del

sistema de impulsión hacia la planta. El sistema fue inicialmente diseñado para captar un caudal de 5.2 m<sup>3</sup>/s, y se encuentra en operación desde al menos 10 años.

**Figura 1: Esquema del sistema de captación en estudio.**



Las principales características del sistema se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1 Características del sistema de captación en estudio.**

Componente	Dimensiones	Comentario
Bocatoma	Diámetro $\Phi = 4$ m, Altura $H = 2$ m.	Campana equipada con barras para evitar ingreso de animales y grandes objetos.
Tubería sifón	Diámetro $\Phi = 1.8$ m, Longitud $L \sim 450$ m.	Tubería de acero al carbono. Incluye singularidades como entradas, salidas y codos.
Sentina	Irrelevantes para el presente análisis.	Equipada con rejas para remoción de elementos extraños.

Por último, cabe mencionar que inicialmente la captación contaba con un sistema de inyección de hipoclorito, pero su uso se encuentra discontinuado.

### 3. MEDICIONES DE TERRENO

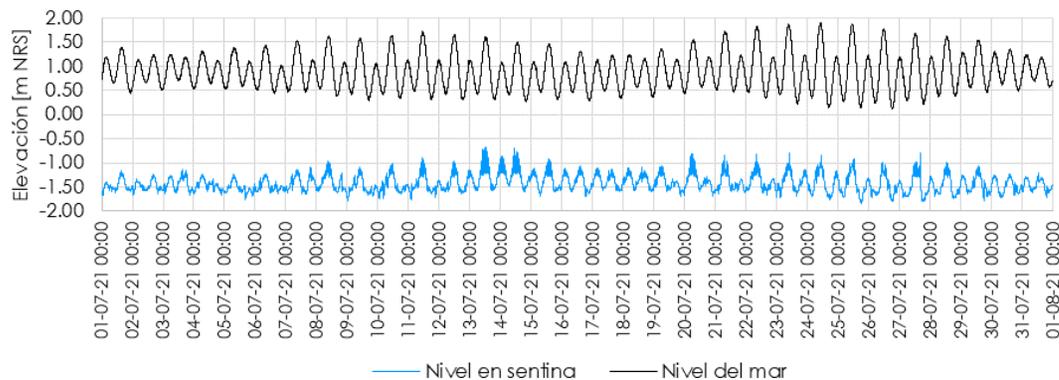
Para la caracterización hidráulica del sistema, y diagnóstico de los parámetros de reducción de diámetro y rugosidad asociados al crecimiento marino, se utilizan mediciones de campo de las variables indicadas en la Tabla 2. El periodo de observación corresponde al mes de julio de 2021. Adicionalmente, el registro de las variables se ha promediado temporalmente cada 10 minutos.

**Tabla 2 Mediciones de campo.**

Variable	Comentario
Nivel del mar	Mediciones del mareógrafo SHOA, que reporta al IOC, ubicado en la bahía del proyecto ( <a href="http://www.ioc-sealevelmonitoring.org">www.ioc-sealevelmonitoring.org</a> ).
Nivel hidráulico en sentina de captación	Medición in situ de nivel.
Caudal de captación	Medición de flujómetro en sistema de impulsión a planta.

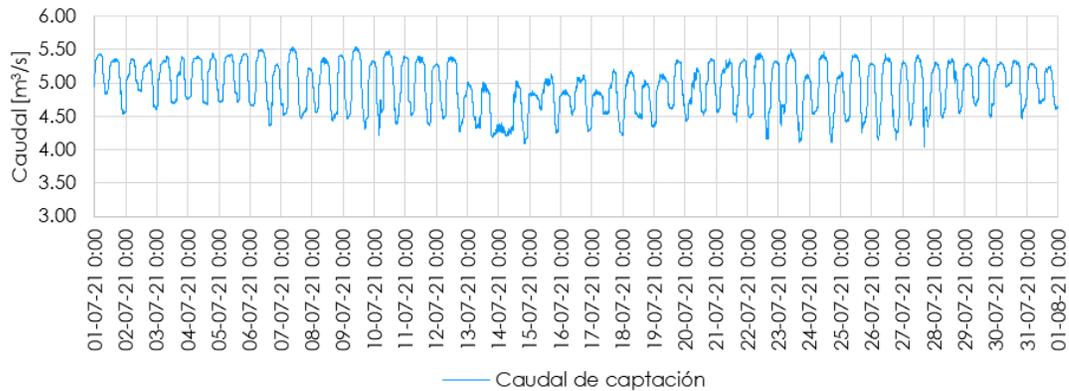
En la Figura 2 se presentan las series de tiempo de nivel del mar y nivel hidráulico en la sentina de captación. Se puede notar la modulación que produce la marea al interior de la sentina.

**Figura 2 Serie de tiempo de marea y nivel en la sentina.**



De la misma manera, en la Figura 3 se muestra la serie de tiempo de caudal de captación. Se aprecia que el nivel de marea también modula al caudal, registrando máximos durante pleamares. Esto se debe a la restricción de caudal que se impone en el sistema para prevenir un descenso del nivel de agua en la sentina por debajo del nivel de sumergencia de las bombas de impulsión.

**Figura 3 Serie de tiempo de caudal de captación.**



#### 4. METODOLOGÍA

El proceso de calibración de los parámetros de rugosidad y espesor de crecimiento marino en la tubería se realiza a partir de la información de terreno disponible (sección §3) y de formulaciones teóricas que permiten estimar la pérdida de carga en flujos interiores.

En primer lugar, la pérdida de carga empírica se calcula como la diferencia entre el nivel del mar y el nivel hidráulico en la sentina de captación. En esta estimación se ha tenido presente la existencia de las siguientes singularidades: contracción del flujo en la entrada a la campana de captación y barras de protección, curvas y codos a lo largo del sifón, expansión del flujo en descarga a sentina y rejas para remoción de elementos extraños.

Por otro lado, se utilizan formulaciones teóricas para estimar la pérdida de carga en el sistema. En la cuantificación de pérdidas singularidades se utiliza el método cinético. Para la determinación de coeficientes se ha consultado literatura especializada (Miller, 2012). La formulación utilizada para cuantificar las pérdidas por fricción involucra parámetros para el espesor del crecimiento marino (**e**) y la rugosidad en la pared de la tubería (**k**). Se utiliza la fórmula de Darcy-Weissbach y la aproximación de Swamee-Jain para determinar el coeficiente de fricción adimensional desde la ecuación de Colebrook-White. Adicionalmente, en ausencia de información respecto del estado de los ánodos de sacrificio durante el desarrollo de esta experiencia, se adopta una pérdida de 1 mm/m para representar la pérdida ocasionada por los ánodos de sacrificio al interior de la tubería.

Por último, de acuerdo con los hallazgos de los trabajos periódicos de inspección y limpieza de los ductos (ver sección §5) se consideran dos tramos de sifón en condición interior diferente, como se resume en la Tabla 3. Para el tramo elevado se utilizan valores de tuberías de acero envejecidas reportados en la literatura (Miller, 2012), y para el tramo enterrado se calibran los parámetros **k** y **e** a partir de los registros de caudal, marea y nivel en la sentina, hasta obtener una curva de carga teórica ajustada a las mediciones.

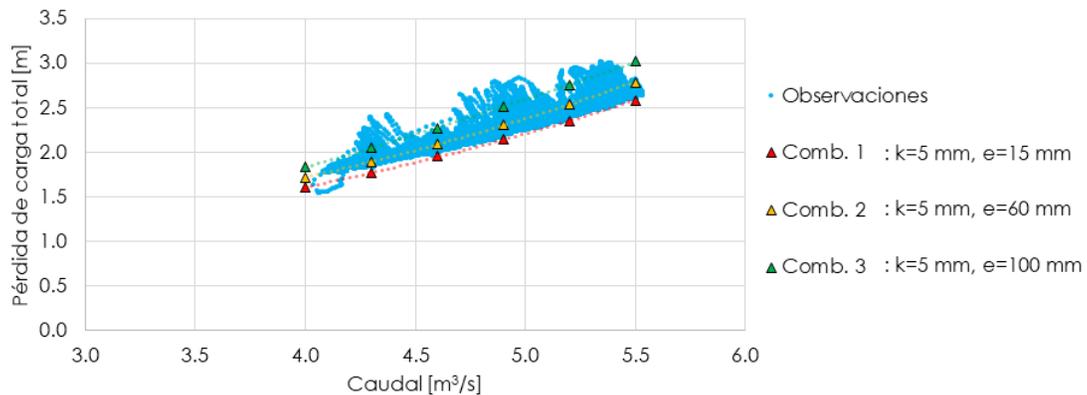
**Tabla 3 Caracterización por tramo de la condición interna de la tubería.**

Tramo	Condición interior tubería	Parámetros
Sifón elevado	Envejecida sin crecimiento marino	$e = 0 \text{ mm}$ , $k = 1 \text{ mm}$ .
Sifón enterrado	Con crecimiento marino	Determinados en §5.

## 5. RESULTADOS

Los datos de campo de las figuras Figura 2 y Figura 3 permiten generar el gráfico de dispersión de pérdida de carga empírica versus caudal que se muestra en la Figura 4. Sobre la nube de puntos se incluyen algunas de las curvas de carga teóricas testeadas, basadas las diferentes combinaciones de rugosidad (**k**) y espesor de crecimiento marino (**e**) que se muestran en la leyenda.

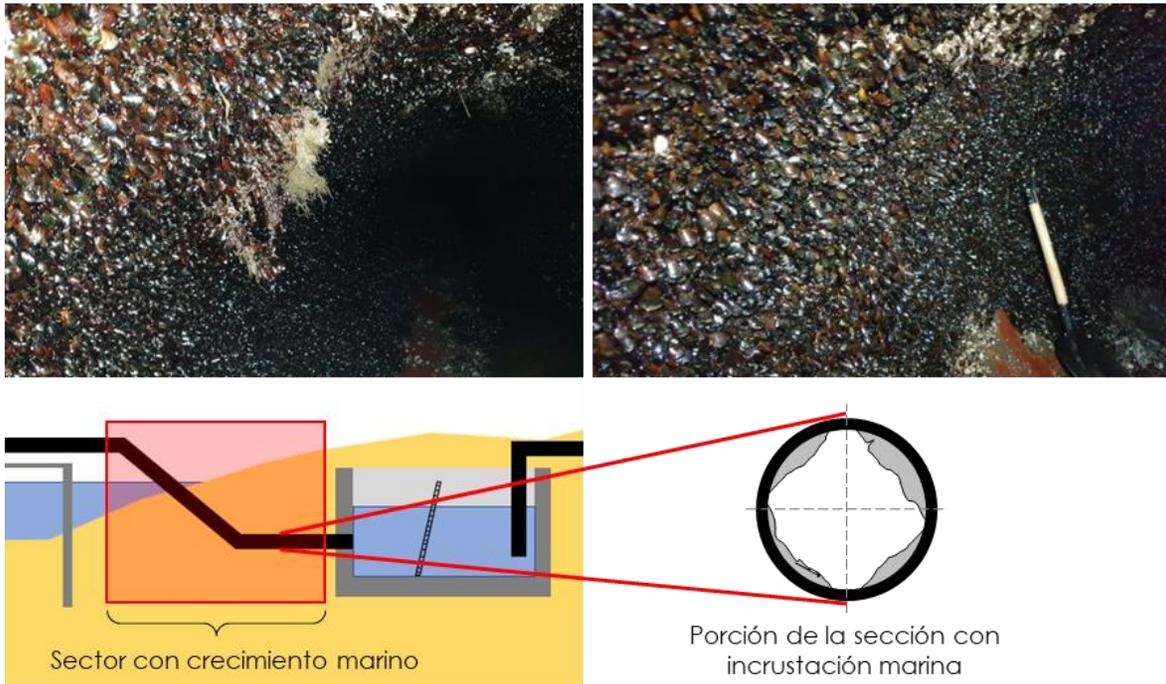
**Figura 4 Gráfico de dispersión pérdida de carga total vs. caudal observado y curvas de carga teóricas.**



Del gráfico se observa que los parámetros que presentan un mejor ajuste con las mediciones corresponden a rugosidad  $k = 5 \text{ mm}$  y espesores entre  $e = 60 \text{ mm}$  y  $e = 100 \text{ mm}$ . Cabe hacer presente que estos valores corresponden a magnitudes promedio en la extensión del tramo enterrado del sifón (longitud  $\sim 90 \text{ m}$ ) y constantes en el perímetro de la sección.

Estos valores concuerdan con hallazgos de terreno de inspecciones y limpiezas realizadas durante abril de 2021, donde se reportan espesores de biota marina de hasta 15 cm en un 80% del perímetro del ducto en su tramo enterrado, como se puede ver en la Figura 5. En el tramo elevado solamente se reportó aparición de "pelillo".

**Figura 5 Registro fotográfico del interior del sifón y tramo con crecimiento marino.**



Adicionalmente, se cuenta con información del ciclo de limpieza anterior, realizado en diciembre de 2020. De acuerdo con reportes de terreno, el nivel de crecimiento marino evidenciado en abril de 2021 se alcanzó en el periodo transcurrido entre limpiezas. Esto es respaldado por el registro fotográfico de la Figura 6. Se puede notar la magnitud del crecimiento marino que se produjo en aproximadamente 4 a 5 meses.

**Figura 6 Comparación registro posterior a limpieza diciembre 2020 y previo a limpieza abril 2021.**



## 6. DISCUSIÓN

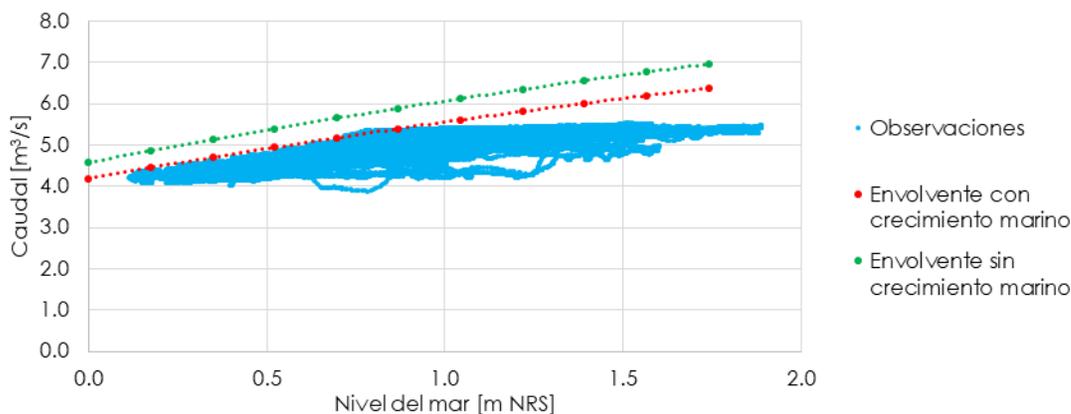
### 6.1 Análisis limitación de capacidad por crecimiento marino

De acuerdo con la información proporcionada por personal de operaciones de las instalaciones en estudio, el sistema de captación debe operar con restricción de caudal durante bajamares, i.e., captar caudales menores al de diseño.

Para este sistema, el nivel hidráulico en la sentina es la condición operacional más restrictiva. Esto porque el nivel en la sentina define la carga hidráulica sobre la succión de las bombas que elevan agua hacia la planta productiva, y por ende el máximo caudal que pueden suministrar. Así, la condición límite es un nivel mínimo en la sentina de -1.8 m NRS.

La metodología presentada en §4 y los resultados de §5 permiten evaluar y explicar las condiciones operacionales del sistema de captación. Con este propósito se ha replicado el análisis hidráulico, pero forzando el nivel en la sentina a su valor mínimo admisible, obteniéndose la capacidad máxima de porteo del sistema para diferentes niveles de marea, es decir, la envolvente caudal – marea. El resultado de este análisis se muestra en la Figura 7. En la figura se muestra como gráfico de dispersión las observaciones de caudal y nivel de marea informados en §3, y la envolvente de caudal asociada a dos condiciones internas del sifón: en verde sin crecimiento marino (correspondiente al criterio utilizado en el diseño original del sistema) y en rojo con crecimiento marino, caracterizado por un nivel de rugosidad  $k = 5$  mm y espesor  $e = 60$  mm.

**Figura 7 Análisis de capacidad del sistema e influencia de parámetros de crecimiento marino.**



Del gráfico se puede observar que la envolvente de caudal con crecimiento marino se ajusta a los datos de campo para niveles del mar bajo 0.8 m NRS (sobre este umbral las bombas de impulsión funcionan a capacidad máxima). Esto sugiere que la operación del sistema está limitada por la sumergencia del grupo de bombeo, y que para satisfacer esta condición se aplican restricciones de caudal. Por el contrario, al descartar el efecto hidráulico del crecimiento marino se obtiene un caudal teórico, en promedio,  $0.5$  m<sup>3</sup>/s superior a la capacidad real máxima del sistema.

## 6.2 Criterio de diseño para tuberías de captación

La discusión de §6.1 da cuenta de la relevancia que adquiere la definición de los parámetros de diseño para incorporar el efecto del crecimiento marino en el diseño de tuberías de captación de agua de mar.

En vista que un procedimiento de limpieza para remoción de crecimiento marino involucra detener el proceso productivo, el mantenimiento de sistemas basados en la ejecución de limpiezas mecánicas podría tener efectos adversos en la operación. Esto se vuelve aún más crítico en infraestructura marítima donde, además, se requiere ejecutar estas faenas en condiciones ambientales favorables, que a menudo no es posible pronosticar con la antelación requerida para establecer las fechas de parada de estos procesos.

Cabe hacer presente también, que la limpieza de estos sistemas se debe asegurar desde su construcción y puesta en marcha, ya que una vez iniciado el proceso de crecimiento marino se dificulta su remoción. De acuerdo con Polman et al. (2012), los sistemas con biocidas *anti-fouling* no son capaces de remover totalmente a algunas especies una vez que se produce su asentamiento al interior de las tuberías, incluso después de ciclos de limpieza físicos, como los reportados en este trabajo.

De este modo, un control efectivo del crecimiento marino requiere prevenir o mitigar su desarrollo en etapas tempranas de formación. La experiencia local en el uso de biocidas (e.g., hipoclorito de sodio) para este efecto es, en general, favorable. Sin embargo, la alta tasa de crecimiento marino (hasta 100 mm en 5 meses según lo observado en esta experiencia), obliga a tener en cuenta consideraciones de diseño adicionales, con el fin otorgar holgura y resiliencia en caso de fallas de estos sistemas o bien de requerir ajustes en su dosificación.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el análisis y calibración de parámetros hidráulicos de espesor y rugosidad en un sistema de captación de agua de mar con crecimiento marino. A partir de datos de campo, se ha realizado un ajuste para estimar estos parámetros y se ha verificado su impacto en el funcionamiento del sistema.

Los resultados obtenidos llevan a sugerir que los efectos del crecimiento marino se deben considerar en los criterios de diseño de este tipo de infraestructura, que se deben orientar a otorgar holgura operacional ante fallas de los sistemas de inyección de hipoclorito.

Por último, cabe mencionar que se requieren esfuerzos adicionales conducentes a caracterizar la magnitud y tasa de crecimiento marino en función la ubicación geográfica, configuración del sistema hidráulico y materialidad de sus componentes, entre otras.

## REFERENCIAS

Fernandes S., Gomes I., Simões L., Simões M., Overview on the hydrodynamic conditions found in industrial systems and its impact in (bio)fouling formation, *Chemical Engineering Journal*, Volume 418, 2021.

Hopkins G., Davidson I., Georgiades E., Floerl O., Morrisey D., Cahill P. (2021), *Managing Biofouling on Submerged Static Artificial Structures in the Marine Environment – Assessment of Current and Emerging Approaches*, *Frontiers in Marine Science*, Volume 8.

Miller D. S. (2012), *Internal Flow Systems*, 2nd ed., Londres: Miller Innovations.

Polman, H.J.G., Jenner, H.A., Bruijs, M.C.M. (2020). Technologies for Biofouling Control and Monitoring in Desalination. In: Saji, V.S., Meroufel, A.A., Sorour, A.A. (eds) *Corrosion and Fouling Control in Desalination Industry*. Springer, Cham.

Polman H., Verhaart F., Bruijs M. (2013) Impact of biofouling in intake pipes on the hydraulics and efficiency of pumping capacity, *Desalination and Water Treatment*, 51:4-6, 997-1003