

# Tecnologías Emergentes

## XXL REFRESH: Tecnología modular para el transporte marítimo de agua dulce a gran escala

**Autor:** Vicent Martínez, Investigador del departamento de Extrusión, AIMPLAS.

Palabras clave: *waterbags*, transporte de agua dulce.

Metas Tecnológicas relacionadas:  
MT 3.1.4; MT 4.1.3.

### Introducción

La escasez de agua es un problema que afecta ya a todos los continentes. Alrededor de mil millones de personas, casi una quinta parte de toda la población mundial, habita en áreas con escasez de recursos hídricos; y se estima que otros 500 millones de personas están en vías de enfrentarse a esta situación. Se estima que hay suficiente agua dulce en el planeta para satisfacer las necesidades de una población de 6.000 millones de personas, pero su distribución es desigual y gran parte se desperdicia, se contamina y se gestiona de manera insostenible. Los problemas derivados de la carencia de agua afectan severamente a la consecución de los Objetivos de Desarrollo del Milenio promovidos por la ONU para asegurar a la población un acceso al agua con garantías de salubridad<sup>1</sup>.

La gravedad del problema se ha resaltado a nivel europeo, tal y como se declaró en 2012 en el VI Foro Mundial del Agua en Marsella. El cambio climático está transformando de manera lenta pero inexorable el litoral mediterráneo en una región semiárida, con veranos más cálidos y secos y sequías más frecuentes, lo que afecta negativamente a la disponibilidad de agua. Más de 3.000 ciudades costeras y unas 400 islas habitadas se encuentran aisladas de las principales reservas hídricas continentales, lo que dificulta el suministro de agua dulce.

<sup>1</sup> UN Water Annual Report 2011. Document available at [http://www.unwater.org/downloads/annualreport\\_2011.pdf](http://www.unwater.org/downloads/annualreport_2011.pdf)



Fig. 1. Prueba de remolcado waterbag REFRESH noviembre 2012. (Fuente: AIMPLAS).

Se proponen diferentes alternativas para asegurar un suministro regular de agua dulce hasta estas localizaciones.

La desalación es un proceso que permite eliminar las sales disueltas del agua de mar. Las plantas desaladoras requieren fuertes inversiones iniciales (unos 15-20 millones de euros para una planta con capacidad de tratamiento de 10.000 m<sup>3</sup>), además de considerables costes de operación y mantenimiento. Se estima que el coste del agua desalada es de 0,40-0,60 €/m<sup>3</sup> dependiendo de la capacidad de producción de la planta. Los vertidos de salmueras de rechazo causan un alto impacto ambiental en los ecosistemas marinos, además del incremento en las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a los altos consumos de energía.

Los trasvases mediante sistemas de canales o tuberías implican elevados costes de diseño, construcción y mantenimiento, que solamente son



Fig. 2. Detalle de ensayos para probar la resistencia de las soldaduras. (Fuente: AIMPLAS).

factibles en caso de requerirse un suministro constante de grandes volúmenes de agua. En el caso de canali-



Fig. 3. Detalle de ensayos para probar la resistencia de la cremallera. (Fuente: AIMPLAS).

zaciones hacia islas, el despliegue de tuberías submarinas supone costes mucho más elevados que no pueden asumirse para el caso de comunidades pequeñas/medianas con picos estacionales de incrementos en la demanda de suministro.

Los buques cisterna constituyen una solución más factible para el suministro de agua a islas o ciudades costeras. Su capacidad de transporte ronda los 50.000 m<sup>3</sup> de agua. El coste de construir un buque nuevo ronda los 30 millones de euros<sup>2</sup> aunque puede recurrirse a la conversión de petroleros monocasco (descartados según la nueva normativa marítima para el transporte de crudo). Estos buques cisterna de segunda mano pueden costar alrededor de 10 millones euros, a los que hay que sumar los costes de limpieza exhaustiva de sus bodegas. Por otro lado, hay que considerar que estos enormes buques solamente pueden operar en puertos con suficiente calado y con la infraestructura de bombeo necesaria para facilitar las operaciones de carga y descarga. Los motores que propulsan estos buques requieren un elevado

consumo de combustibles muy contaminantes, alrededor de 300 kg/km para un buque que desplace 200.000 toneladas. Se estima que el coste de agua transportada utilizando este medio se sitúa entre 8 y 12 €/m<sup>3</sup>.

Debido a los altos costes descritos, el transporte de grandes cargas de agua solamente puede justificarse para asegurar el suministro a poblaciones en severas condiciones de carestía.

### Waterbags

Debido a las limitaciones de los sistemas descritos anteriormente, se propuso el transporte de agua dulce mediante enormes bolsas flotantes que pudieran ser remolcadas por el mar. La idea original se atribuye al ingeniero inglés Sir Barnes Wallis en 1930, pero el primer intento práctico se concretó en 1958 por Sir William Hawthorne que construyó en Cambridge unas barcasas flexibles para el transporte de grandes volúmenes de agua, crudo u otros líquidos. Este concepto fue adaptado en los años 1980 y 1990 por diferentes compañías como Terry Spragg (EEUU) o Nordic Water Supply (Noruega) que llevaron a cabo pruebas pioneras en diferentes lugares del mundo.

La compañía Nordic Water Supply basó su concepto en la fabricación de una enorme bolsa monolítica de

10.800 m<sup>3</sup> de capacidad. El objetivo era proveer un suministro bianual de 7 millones de m<sup>3</sup> a un coste de 2,7 millones de euros por año. Pero en la práctica solamente pudo realizarse un suministro total de 4 millones de m<sup>3</sup> durante un periodo de 4 años debido a las constantes roturas en la bolsa por las tensiones generadas en el proceso de remolcado, especialmente en condiciones adversas de navegación. Por otro lado, la manipulación de una gran bolsa monolítica se reveló muy compleja, tanto en vacío como en carga. Una vez vaciada, la bolsa se recogía y plegaba con un cabrestante de grandes dimensiones, lo que dañaba al material.

La propuesta de Terry Spragg se basó en un sistema de varias bolsas conectadas que permitieran desplazar un gran volumen total de agua a la vez. Cada bolsa tenía unas dimensiones de 75 m de longitud y 9 metros de diámetro. La compañía italiana Zioplast fabricó unas cremalleras de altas prestaciones para conectar ambas bolsas y permitir que fueran remolcadas como un solo bloque. Se llevaron a cabo una serie de pruebas en la costa de California en 2009, pero las enormes tensiones implicadas dieron lugar a roturas en el material con el que se confeccionaron las bolsas.

### Sistema flexible y modular de contenedores REFRESH

El proyecto original REFRESH<sup>3</sup> ha tenido como objetivo el desarrollo de una solución con un coste efectivo y energéticamente eficiente para el transporte marítimo de agua dulce, que consiste en un sistema modular de contenedores flexibles flotantes interconectados y remolcados por un remolcador. El enfoque de REFRESH muestra un impacto medioambiental más bajo con respecto a otras tecnologías de abastecimiento de agua dulce, como las plantas desalinizadoras, y posee una clara ventaja de relación efectividad-coste con respecto a buques cisterna alternativos.

La idea de desarrollar un sistema de transporte marítimo de agua dulce mediante el uso de grandes bolsas de agua no es nueva en sí, como se ha

<sup>3</sup> REFRESH Green technology for fresh water sea-transportation based on a flexible containers system FP7-SME-2010-1 GA 262494

<sup>2</sup> Mc Niven, El-Ayoubi, 2005, "Bulk water Exports: Environmental Concerns and Business Realities" Dalhousie University, and from "Prevention of air pollution from ships", Ocean Policy Research Foundation.



Fig. 4. Sistema de sensores de tensión instalados en el prototipo de REFRESH. (Fuente: AIMPLAS).

visto anteriormente. El gran avance que ofrece el sistema REFRESH se basa en el hecho de que cada módulo es lo suficientemente pequeño para ser fácilmente manejable, pero cuando se ensambla el sistema entero es lo suficientemente efectivo para ofrecer una capacidad de carga a un coste eficiente, puesto que permite un servicio flexible que ajusta la carga total a las necesidades reales del receptor.

El material escogido para las *waterbags* de REFRESH es un tejido de poliéster reforzado con un recubrimiento de PVC de alta tenacidad y resistencia al desgarro para soportar las enormes tensiones implicadas durante el remolcado en el mar. Los tejidos de poliéster recubiertos de PVC se usan en diferentes aplicaciones (lonas, carpas, tiendas de campaña, cubiertas, tanques flexibles para contención de líquidos, etc.), debido a su bajo coste y a su óptimo rendimiento combinando flexibilidad, resistencia, extensibilidad y un bajo peso. Además, ofrece buenas propiedades de resistencia química y de envejecimiento a los agentes ambientales.

En una primera fase se fabricó un prototipo de tamaño medio para evaluar la viabilidad del diseño propuesto y el comportamiento de los materiales seleccionados para soportar los requisitos previstos. Este primer pro-

totipo de REFRESH consistió en dos módulos individuales conectados por cremalleras; tenía 4,1 m de diámetro y 20 m de longitud, con una capacidad total de 200 m<sup>3</sup> (ver figura 1). Los ensayos tuvieron lugar en Creta (Grecia) en noviembre de 2012. El contenedor pudo desplegarse y montarse sobre el muelle con la ayuda de unos pocos operarios. Una grúa ayudó a colocar la *waterbag* en el mar para empezar la operación de llenado.

Para remolcar el *waterbag* se empleó un remolcador con un motor de propulsión principal de aproximadamente 2.000 CV. Se llevaron a cabo múltiples pruebas de navegación, con el objetivo de evaluar el comportamiento hidrodinámico del contenedor flexible. Como resultado principal, el prototipo soportó las exigentes condiciones de remolque evaluadas. El tejido reforzado no se rompió ni se deformó y se comprobó que no se produjeron roturas o delaminaciones en las líneas de soldadura. Además, el sistema de cremalleras fue capaz de transmitir de manera correcta la tensión de tracción entre los módulos conectados sin que se detectara rotura o fuga de agua.

#### Waterbag a gran escala REFRESH XXL

Después del éxito de las pruebas de navegación llevadas a cabo con

el prototipo de 200 m<sup>3</sup> se desarrolló XXL-REFRESH<sup>4</sup>, un proyecto de demostración con el objetivo de producir una versión comercial a gran escala del *waterbag* modular, con una carga de entre 2.000 y 5.000 m<sup>3</sup>.

Dentro del desarrollo del proyecto, la empresa española INDUSTRIAL SEDÓ ha desarrollado unos tejidos reforzados (ver figura 2) con fibras de poliéster con una trama de tejido específico para soportar los requisitos de alta demanda de resistencia a la tracción y resistencia al desgarro previstas para el *waterbag* (700 daN/5cm). Además, los tejidos recubiertos con PVC pueden ser soldados por medio del método de alta frecuencia, ofreciendo una soldadura de alta resistencia. Esta característica permite la fabricación de contenedores flexibles uniendo diferentes capas de tejidos recubiertos de PVC y también la inserción del sistema de cremalleras.

La cremallera, producida por la empresa italiana ZIPLAST, es la pieza clave del Sistema REFRESH. Su extrema resistencia mecánica permite conectar los módulos individuales

<sup>4</sup> XXL-REFRESH Bringing a modular technology for fresh water sea-transportation to full scale FP7-SME-2013 GA 606423

## tecnologías emergentes

a la vez que se mantiene la estanqueidad para evitar fugas. La cremallera desarrollada en el marco del proyecto REFRESH (ver figura 3) mostró una resistencia transversal de 24 t/m, convirtiéndola en la cremallera hermética más resistente del mundo.

Dispone de un sistema de sensores de tensión producido por la empresa checa SAFIBRA (ver figura 4), que mide la extensión de las fibras de manera precisa (resolución de décimas de milímetro sobre un metro de fibra). Los datos se envían a tiempo real al puente de mando del remolcador para que el capitán pueda ajustar las condiciones de navegación. En las pruebas de navegación realizadas, los sensores confirmaron que las deformaciones están muy por debajo de la resistencia de rotura del tejido incluso a plena velocidad.

La fabricación del *waterbag* y la integración de todos los materiales y componentes la llevó a cabo la empresa española TECNODIMENSION, desde la concepción del diseño utilizando herramientas CAD/CAM hasta el desarrollo del producto acabado utilizando la tecnología más avanzada.

También ha participado la consultora italiana de ingeniería D'APPOLO-NIA, que ha contribuido al diseño del *waterbag* llevando a cabo el análisis de simulación mediante método de elementos finitos (FEM, sus siglas en

inglés) y el grupo marítimo turco TURGUT REIS, que dirigió las operaciones para las pruebas de navegación con el remolcador. El Instituto Tecnológico del Plástico, AIMPLAS, ha llevado a cabo los ensayos y análisis para evaluar el comportamiento de los materiales, incluidos la resistencia mecánica, el envejecimiento en ambiente marino y los ensayos de migraciones y compatibilidad alimentaria para asegurar que el material cumple con la Normativa Europea.

El compromiso de todas las empresas del consorcio del proyecto ha llevado a la integración satisfactoria de todos los elementos del sistema REFRESH XXL y ha hecho posible la fabricación de un prototipo a tamaño real para probar el comportamiento de los materiales en condiciones reales de uso.

### Pruebas de navegación REFRESH XXL

Como resultado principal del proyecto REFRESH XXL, se fabricó un prototipo compuesto por 5 módulos conectados por cremalleras de alta resistencia. Las dimensiones totales del *waterbag* son: 65 m de longitud, 11 m de ancho y aproximadamente 4 m de profundidad. La capacidad del volumen de agua era superior a los 2.000m<sup>3</sup>.

Las pruebas de navegación se llevaron a cabo en la bahía de Sant Car-

les de la Ràpita (Tarragona), en diciembre de 2015 (ver figura 5). Una serie de operadores desplegaron y montaron los módulos del contenedor flexible en el muelle del puerto. A continuación, comenzó el llenado con agua dulce hasta que se alcanzó aproximadamente la capacidad máxima.

Se empleó un remolcador con un motor de propulsión principal de aproximadamente 2.000 CV y 45 toneladas de fuerza de remolque. La prueba de navegación consistió en un trayecto de 20 millas náuticas en la bahía de Sant Carles de la Ràpita. La longitud del cable del remolcador se incrementó progresivamente de 30 a 100 m a medida que el remolcador aumentaba la velocidad de cruce hasta alcanzar los 5,3 nudos. La prueba de navegación se prolongó alrededor de 3 horas.

Se evaluó el comportamiento hidrodinámico del contenedor flexible y como resultado principal el *waterbag* REFRESH XXL demostró resistir las duras condiciones de remolque que se evaluaron; el tejido recubierto de PVC no mostró roturas ni deformaciones y tampoco hubo roturas o delaminaciones en las líneas de soldadura. Además, el sistema de la cremallera fue capaz de transmitir de manera adecuada la tensión entre los módulos conectados sin roturas ni fugas de agua.



Fig. 5. Pruebas de navegación en la bahía de Sant Carles de la Ràpita en diciembre 2015. (Fuente: AIMPLAS).