

Innovaciones en la construcción del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá

Innovation in the Construction of the Third Set of Locks of the Panama Canal

Sergi Ametller^{1*}, Arlene Carrión², Elías González², Ricardo Rojas² y Alessandro Zaffaroni²

Resumen

La ampliación del canal de Panamá ha sido catalogada en varias publicaciones como la obra más importante de los últimos años a nivel mundial. No hay duda que la importancia estratégica del Canal de Panamá y su épica construcción original han influido en esta consideración. No obstante, existen otros elementos que han contribuido al interés mediático suscitado en todo el planeta durante su construcción. Entre dichos elementos técnicos destacan los enormes volúmenes de obra, las dimensiones de las compuertas empleadas, las piscinas de ahorro de agua y la singularidad del proyecto en sí mismo.

El Tercer Juego de Esclusas consiste en dos complejos de esclusas de tres niveles cada una con tres tinas de reutilización de agua por nivel, una en el lado Pacífico y otra en el Atlántico. Las nuevas esclusas tienen 427 metros de largo, 55 metros de ancho y 18,3 metros de profundidad mínima. Este proyecto medioambientalmente responsable, con un sistema de tinas que ahorran un 60% de agua en cada operación, ha supuesto para Sacyr un gran desafío antes de comenzar las obras y durante los trabajos, ya que se plantearon nuevos retos en los diseños necesarios, en la fabricación, instalación y también en la puesta en marcha de las esclusas hasta su inauguración el pasado 26 de Junio de 2016. Entre dichos retos cabe destacar el diseño, fabricación, traslado e instalación de las 16 nuevas compuertas, de enormes dimensiones y que requerían una milimétrica colocación. Las compuertas son un prototipo en muchos aspectos, en su sistema de flotabilidad para transmitir cargas al sistema de apoyo y traslación inferiores, así como en el sistema de sello y apoyo de la compuerta que requirió soluciones basadas en combinaciones de elementos de polietileno de alta densidad (UHMWPE) y aceros de altas prestaciones. Otra característica de esta obra que la hace singular en frente a muchas otras es el hecho que combina una obra civil de grandes volúmenes con elementos propios de una obra industrial también de gran magnitud y de elevada complejidad. Ha existido una gran simultaneidad de actividades (civiles, mecánicas, eléctricas y de control) que solo se consigue gestionar mediante la adecuada preparación y con un sistema de control práctico y efectivo.

Se debe destacar finalmente que la capacidad de innovar de los técnicos que han participado en esta obra ha sido una de las claves para poder superar el reto al que se comprometió SACYR frente a Panamá y el resto del mundo.

Palabras clave: Canal de Panamá, esclusas, canal, Panamá, innovación, Sacyr, compuertas, construcción, EPC, WSB, hidráulica, Grupo Unidos por el Canal, GUPC, filtraciones, ahorro agua, sostenibilidad ambiental, ingeniería, puesta en marcha.

Abstract

The expansion of the Panama Canal has been cataloged in several publications as the most important construction of recent years worldwide. There is no doubt that the strategic importance of the Panama Canal and its original epic construction have influenced this consideration. However, there are other elements which have contributed to media interest around the world during its construction. Among these technical elements are the huge volumes of work executed, the dimensions of the rolling gates, the water-saving basins and the singularity of the project itself.

The Third Set of Locks consists of two lock complexes of three levels each, with three water-saving basins per level, one set on the Pacific side and the other on the Atlantic. The new locks are 427 meters long, 55 meters wide and 18.3 meters minimum depth. This environmentally-friendly project, with a basin system that saves 60% of water in each operation, has posed great challenges for SACYR, both before starting work and during the whole construction. New challenges appeared in the required design, in the erection, in the equipment installation and also during the commissioning of the locks up to their inauguration last June 26, 2016. Among these challenges, it is important to highlight the design, manufacture, transfer and installation of 16 new rolling gates, all with enormous dimensions and which had to be installed with millimetric precision. The gates are a prototype in many respects, such as their buoyancy system to convey loads to the lower support and transfer system, as well as the gate seal and support system which required solutions based on combinations of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) and high-performance steel. Another feature of this work that makes it unique is the fact it combines civil work of great volume with elements of industrial work which are also of great magnitude and high complexity. Many activities (civil, mechanical, electrical and control) have been carried out simultaneously, something which can only be managed through thorough preparation and a practical and effective control system.

Finally, it should be emphasized that the innovation capability of the technicians involved in this work has been one of the keys to overcoming the challenge that SACYR took on before Panama and the rest of the world.

Keywords: Panama Canal, locks, canal, Panama, innovation, Sacyr, gates, construction, EPC, WSB, hydraulic, Grupo Unidos por el Canal, GUPC, leakage, water saving, environmental sustainability, engineering, commissioning.

* Autor de contacto: sametller@sacyr.com

¹ Jefe de Obra GUPC (Grupo Unidos por el Canal) – SACYR.

² Departamento E&M GUPC.

1. INTRODUCCIÓN

El Canal de Panamá ha tenido un éxito indiscutible en la logística internacional del transporte marítimo ya que ha permitido el tránsito de más de un millón de buques desde su inauguración en el año 1914. Como consecuencia de ese éxito y con la necesidad de ampliar su capacidad, los ciudadanos panameños decidieron en el referéndum del 22 de octubre de 2006 la construcción del tercer juego de esclusas del Canal de Panamá. Esta decisión ha implicado una inversión de más 5.250 millones US\$ y pretende captar la demanda estimada hasta más allá del año 2025 construyendo un tercer juego de esclusas con capacidad para doblar las toneladas que en total transitan anualmente por el canal.

Las dimensiones de las cámaras de las nuevas esclusas se establecieron en base a las de los buques Neopanamax, con una eslora de 366 m, una manga de 49 m y un calado máximo de 15 m. Este buque de diseño fue considerado como el de capacidad objetivo y tamaño de uso rutinario en rutas comerciales. Su capacidad máxima es de 14.500 TEUs (unidad equivalente a un contenedor normalizado de 20 pies de largo, por 8 pies de ancho y 8,5 pies de altura), tres veces superior a la capacidad de los mayores buques admisibles hasta la fecha, los Panamax, que con 294 m de eslora, 32 m de manga y 12 m de calado, pueden transportar 4.500 TEUs. Las dimensiones de las nuevas esclusas pueden recibir, además, buques de graneles sólidos y líquidos tipo Capesize y Suezmax respectivamente, con capacidades de carga superiores a los 160.000 TPM (toneladas de peso muerto), buques de transporte de gas LPG y LNG de volúmenes superiores a los 135.000 m³, cruceros y carcarriers con capacidad de transporte de más de 8.500 vehículos.

En la figura 1 se muestra una imagen en planta del Canal de Panamá ampliado con las actuaciones que se ha sido necesario acometer.

El proceso de licitación del Tercer Juego de Esclusas se inició el 21 de diciembre de 2007 con la emisión de la solicitud de propuestas por parte de la ACP (Autoridad del

Canal de Panamá) para el proyecto. El 15 de Julio de 2009 se adjudicaron dichos trabajos al consorcio GUPC (Grupo Unidos por el Canal), el cual obtuvo la mejor puntuación técnica y económica (presupuesto base de 3.119 millones USD). El consorcio GUPC está formado por las siguientes empresas:

- Contratistas:
 - SACYR (España); líder del Consorcio
 - SALINI IMPREGILIO (Italia)
 - JAN DE NUL (Bélgica)
 - CONSTRUCTORA URBANA (Panamá)
- Principales Subcontratistas:
 - CIMOLAI (Italia): fabricante del sistema de compuertas
 - HYUNDAI HSHI (Corea): responsable de las válvulas y sistemas de llenado y vaciado
 - LEONARDO (Italia): responsable del sistema de control de procesos
 - INDRA (España): responsable de los sistemas de comunicación y seguridad
 - EATON (USA), EIASA (Colombia), CENTELSA (Colombia): responsables del suministro de los sistemas eléctricos
 - MWH (USA), Tetrattech (USA), IV Infra Groep (Holanda), SENER (España), Mallol (Panamá): diseño

Los trabajos de construcción culminaron con la inauguración de la obra el pasado día 26 de junio de 2016 con el tránsito del buque Cosco Shipping Panama con 10.000 TEUS a bordo.

En los apartados siguientes se describe el funcionamiento general de las esclusas así como los detalles de los principales elementos electromecánicos que permiten su operación. En cada uno de estos elementos se hará especial hincapié en las innovaciones que han sido necesarias para completar con éxito este proyecto.

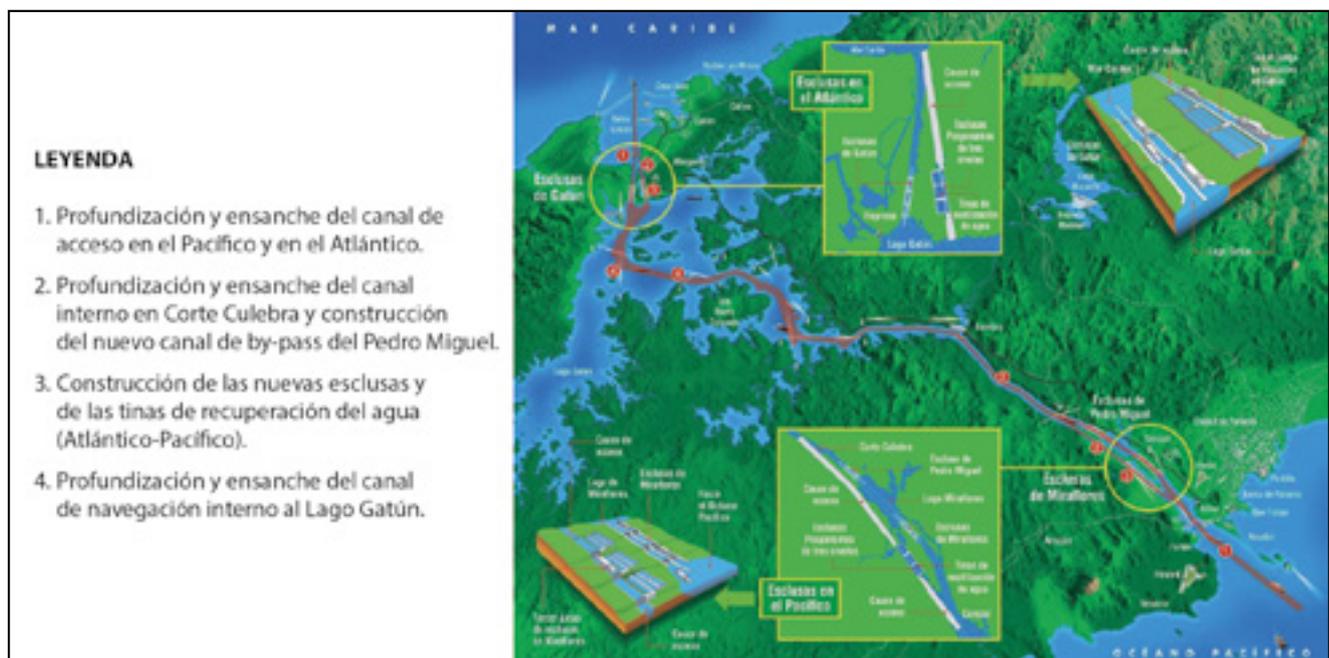


Figura 1. Vista general de la ampliación del canal de Panamá.

2. DESCRIPCIÓN DEL TERCER JUEGO DE ESCLUSAS

El sistema de esclusas original se basó en el concepto de crear un lago artificial elevado (actual lago Gatún) con una profundidad que permitiera a los buques atravesar Panamá de Océano a Océano y la construcción de unas esclusas en cada extremo de la vía para permitir el descenso de los buques del lago al Océano o viceversa, ascender del Océano al lago. Las operaciones de ascenso o descenso del buque se consiguen mediante el movimiento por gravedad del agua proveniente del lago y acumulada anualmente en los periodos de lluvia que registra Panamá.

Las esclusas originales del Canal de Panamá cuentan con dos vías paralelas, denominadas juegos, tanto en el lado del Pacífico como en el del Atlántico (ver figura 1). El funcionamiento general del Tercer Juego de Esclusas es similar al construido por Estados Unidos hace 100 años, aunque presenta diferencias significativas en los equipos utilizados. Como el sistema original, el Tercer Juego de Esclusas salva el desnivel de aproximadamente 27 metros existente entre la cota cero de los océanos Atlántico y Pacífico y el nivel del lago Gatún. Para ello, utiliza tres saltos de unos 9 metros cada uno, comunicados mediante compuertas. El complejo de esclusas del lado Pacífico se ha denominado Cocolí y el de Atlántico Agua Clara, siguiendo el nombre de los ríos en cada zona. A diferencia de la disposición en inglete de las compuertas originales, las nuevas compuertas son rodantes, quedando recogidas en unos nichos laterales de hormigón (ver figura 4). Todos los elementos esenciales del Tercer Juego de Esclusas están duplicados, asegurando la operatividad del sistema incluso durante la avería de alguno de ellos. De tal modo que existen ocho compuertas en cada complejo, cuatro parejas en la costa atlántica y otras cuatro en la pacífica.

El llenado y vaciado de las cámaras se realiza a través de un sistema de galerías -conductos principal y secundario-operado mediante válvulas y que funciona completamente por gravedad. Estas galerías recorren longitudinalmente los muros laterales de hormigón y se comunican con las cámaras mediante conductos dispuestos horizontalmente a cota de la solera, a diferencia del canal original, en que la entrada de agua a las cámaras se realiza verticalmente en

la solera. El Tercer Juego de Esclusas cuenta, además, con un sistema complementario de reutilización de agua. Este sistema consiste en una batería de tinas – water saving basins (WSB)- dispuestas en paralelo a las cámaras, que son capaces de reutilizar hasta el 60% del agua necesaria en una maniobra completa de esclusaje. Cada cámara cuenta con tres tinas, dispuestas en tres niveles, que se vacían y se llenan por gravedad y se gestionan también mediante válvulas.

Cabe además destacar que el Canal de Panamá original cuenta con un sistema de posicionamiento de los buques muy singular. Un conjunto de locomotoras remolcadoras guía las embarcaciones desde los cajeros de las esclusas, permitiendo que se desplacen en las cámaras totalmente centradas. En el nuevo canal se usan remolcadores en el interior de las cámaras para conseguir el mismo objetivo.

Los trabajos de las obras de ampliación se concentraron en una superficie de 2.300 metros por 350 metros donde se ubican las tres cámaras que albergan 2 compuertas en cada uno de sus extremos y las piscinas de ahorro de agua, tal y como se muestra en las figuras 2 y 3 a continuación.

Aparte de las propias esclusas, en el lado atlántico también se incluye el dragado del canal de aproximación y la estructura de aproximación noreste, cuya función es la de orientar el buque y alinearlo en la entrada a la primera esclusa. Este muelle de aproximación presenta una longitud de 500 metros y se ha construido en tipología pila – tablero prefabricando las vigas en la misma obra. En el lado Pacífico se ha dragado igualmente el canal de acceso y se han dispuestos dos estructuras de aproximación, una a cada extremo de las esclusas, construidas mediante la misma tipología que en el sector atlántico.

Las esclusas originales del sector Pacífico tienen una diferencia fundamental en relación a las del Atlántico ya que no están dispuestas como una sucesión de tres saltos consecutivos de 9 metros cada uno. Se disponen las esclusas de Miraflores con dos saltos y las de Pedro Miguel con un salto. Por este motivo ha sido necesario disponer de un canal que conecta la salida de las nuevas esclusas de Cocolí con la de Pedro Miguel. De todo este tramo,

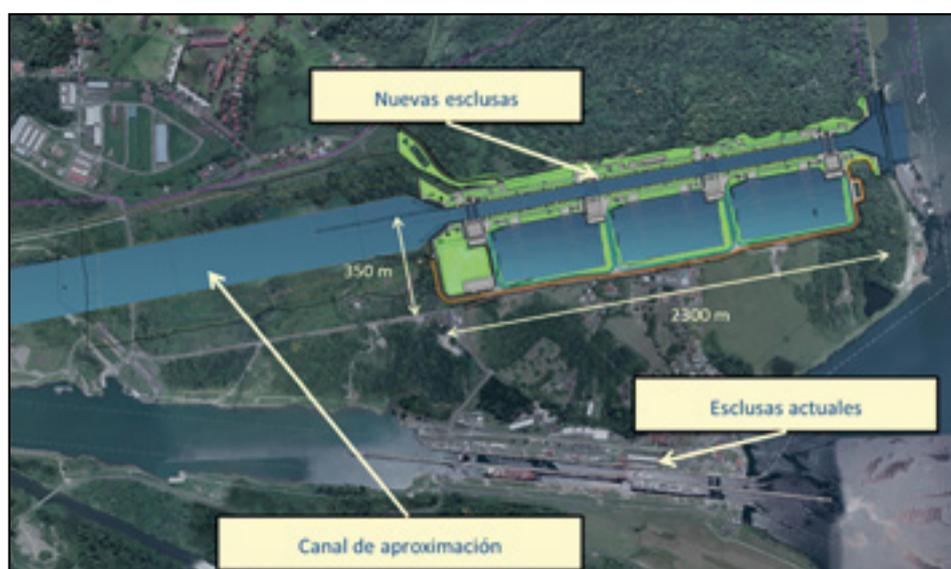


Figura 2. Vista general del proyecto.

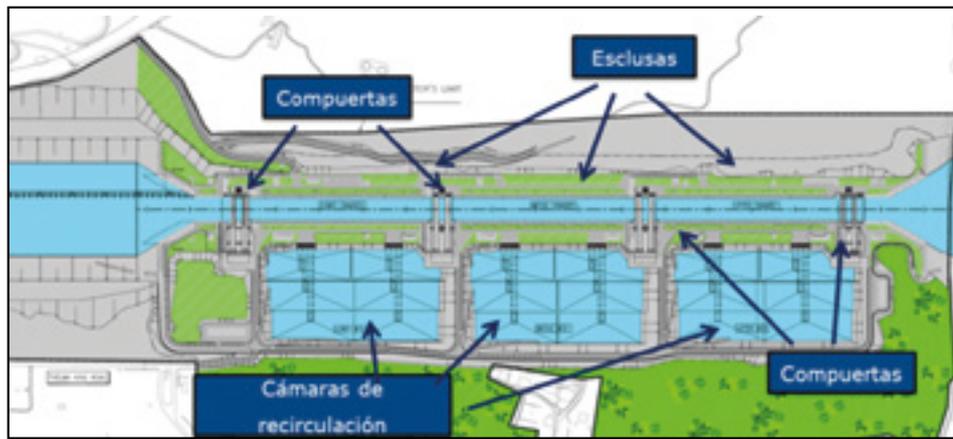


Figura 3. Elementos principales del proyecto (lado Atlántico).

sólo los 1.400 m más próximos a las esclusas pertenecen al contrato del Tercer Juego de Esclusas y es donde se han construido las presas Borinquen. El resto, unos 4.900 m, es objeto de otros contratos (PAC 1-4). El fondo de este canal estará a +9,14 m y el nivel máximo de llenado alcanzará la misma cota que el lago, +27,13 m como nivel máximo operativo. Por su parte, el lago Miraflores se mantiene a un nivel estacionario de +16,45 m. Las presas Borinquen alcanzan una altura máxima de 37 m y la berma superior cuenta con una anchura de 30 m. Ambos

taludes presentan inclinaciones 3:1. En el extremo superior de la figura 5 se muestran dichas presas.

En la tabla 1 a continuación se resumen las magnitudes más significativas del proyecto ejecutado.

Asimismo, en los apartados a continuación se muestran en mayor detalle los sistemas electromecánicos principales que permiten la operación del canal. Se han incluido el sistema hidráulico de llenado y vaciado, las compuertas, el sistema de control y el resto de sistemas auxiliares.

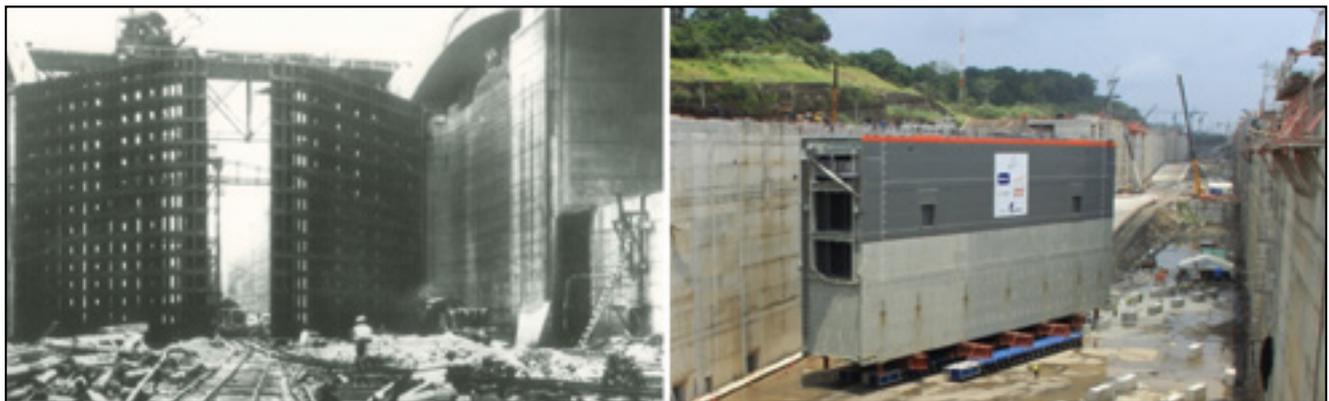


Figura 4. Tipología de compuertas (fotografías durante su montaje en el año 1913 versus 2013).

Tabla 1. El Canal en Cifras - Elaborado por Grupo Unidos por El Canal

DATOS GENERALES DEL CANAL ACTUAL	
Longitud del canal	77 km
Desnivel entre océanos y lago	27 m (aunque variable según las mareas y nivel en el lago)
Dimensiones de las cámaras	304,8x33,5x12,8 m
Características de los mayores buques permitidos	289,6x32,3x12 m
Volumen de agua desembalsada por esclusaje	96.300 m ³
Porcentaje actual del comercio marítimo mundial (sin ampliación)	5%
Capacidad Toneladas anuales en tránsito (sin ampliación)	330 millones de toneladas CP/SUAB
Tránsitos anuales	Casi 14.000
DATOS GENERALES DEL TERCER JUEGO DE ESCLUSAS	
Duración de las obras	6 años
Periodo de mantenimiento incluido en Contrato	3 años
Volumen de trabajos de construcción	112 millones de horas hombre
Volumen de trabajos de diseño	3 millones de horas hombre
Manuales de operación entregados a la ACP	300 manuales

Continúa en página siguiente.

OBRA CIVIL	
Volumen de excavación (estructuras y canteras)	68 millones m ³
Volumen de rellenos (estructuras, presas y vertederos)	50 millones m ³
Volumen de hormigón estructural	5 millones m ³
Volumen de material dragado	6 millones m ³
Peso de acero para armar	269.000 toneladas
Presas Borinquen de materiales sueltos	Casi 3 km de longitud total, 37 m de altura, 30 m de anchura de la berma superior.
Capacidad planta de machaqueo primaria	3.300 toneladas/hora (Pacífico)
Capacidad plantas de machaqueo secundaria y terciaria	1.300 toneladas/hora (Pacífico y Atlántico)
Rendimiento alcanzado en fabricación de hormigón	540 m ³ /hora
Rendimiento alcanzado en vertido de hormigón en obra	5.000 m ³ diarios
Tránsito punta de camiones en el lado Pacífico	2.000 camiones diarios
Edificios (96 unidades)	47.000 m ²
SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS	
Número total de válvulas	158
Peso total de acero en válvulas y sus accesorios	20.000 toneladas
Caudal medio durante el esclusaje	550 m ³ /s
Número total de compuertas	16
Peso total de acero en compuertas	51.000 toneladas
Dimensiones de la compuerta mayor	57,6 m x 10 m x 33,04 m
Peso de acero en la compuerta mayor	3.900 toneladas
Número total de cabinas de media tensión (12 kV)	32
Potencia instalada en transformación por cada complejo	26 MVA en cada uno de los dos anillos redundantes
Capacidad instalada en baterías para cargas críticas (4h)	20.000 Ah
Longitud total de cables eléctricos instalados	2.000 km
Longitud total de cables de fibra óptica instalados	400 km
Gestión del sistema de control por cada complejo	100.000 señales / 34 servidores 74 estaciones de trabajo / 500 PLC
LAS NUEVAS ESCLUSAS EN SERVICIO	
Confiabilidad (% tiempo operativo)	99,6%
Capacidad máxima con tinas	15 buques/día
Capacidad máxima sin tinas	18 buques/día
Capacidad Toneladas anuales en tránsito	300 millones de toneladas CP-SUAB
Volumen de agua desembalsada con tinas	90.000 m ³ /esclusaje
Volumen de agua desembalsada sin tinas	230.000 m ³ /esclusaje
Dimensiones de las cámaras	427 m x 55 m x 18,3 m (profundidad mínima)
Características de los mayores buques permitidos	Neopanamax (12.500 TEUs, 366x49x15,2 m)
Vida útil de diseño del hormigón	100 años
Vida útil de diseño de las compuertas	50 años
FACTOR HUMANO	
Número de trabajadores	40.000 personas
Procedencias	79 nacionalidades distintas
Beneficiarios de cursos de formación	21.800 personas
Trabajadores en periodo pico	14.000 personas
Equipo de trabajo en Enero 2016	790 personas staff expatriado 931 personas staff panameño 3.460 trabajadores
Operarios de ACP formados por el Contratista para la operación y el mantenimiento del Proyecto	160 personas
MEDIO AMBIENTE	
Número de animales rescatados	Más de 4.500
Superficie reforestada	2.800 ha
Número de árboles plantados	5,8 millones
Balance CO ₂ estimado por reducción de tránsitos	160 millones de toneladas de CO ₂ anuales



Figura 5. Vista obra terminada en 2016 – lado Pacífico.



Figura 6. Vista obra terminada en 2016 – lado Atlántico.

3. SISTEMA HIDRÁULICO DE LLENADO Y VACIADO

El sistema hidráulico de las nuevas esclusas se diferencia del canal original en dos elementos principales: las presas Borinquen que comunican el juego de esclusas del lado Pacífico, tal y como se ha detallado en la introducción, y la implementación de las tinas para la recuperación de agua (“Water Saving Basins, WSB”). Esta solución permite manejar buques con 2-3 veces más carga, pero utilizando un 7% de agua menos que el canal original.

Las nuevas esclusas se deben entender en su concepción, como una gran máquina hidráulica concebida para pasar enormes volúmenes de agua en pocos minutos. El diseño del sistema de llenado y vaciado requirió estudios con

supercomputadores y modelos físicos para asegurar el cumplimiento de los requisitos del contrato. En efecto, los desafíos no se limitaban solamente a los tiempos necesarios para equilibrar las cámaras adyacentes, pero también a su durabilidad (control de vibraciones, cavitación, entrada de aire) y de seguridad (la superficie del agua tienen que mantenerse lo más horizontal posible para evitar movimientos excesivos en los buques que generen esfuerzos elevados en sus amarras). Veamos a continuación en detalle cómo funciona el sistema y se harán evidentes los desafíos a los que nos hemos enfrentado.

Las esclusas funcionan gracias al principio de vasos comunicantes. Cada cámara es un contenedor de agua que, con el uso de válvulas, se comunica con la adyacente. De esta manera el agua de la cámara a mayor altura baja hacia

la de menor altura hasta que alcancen la misma elevación. Nunca se bombea el agua hacia arriba, el agua siempre baja de una cámara a la siguiente por gravedad. Si el barco se encuentra en la cámara que se quiere vaciar, bajará junto con el nivel de agua. Si se encuentra en la que está más vacía, entonces subirá. Ésta es la teoría, ahora hay que ponerla en práctica. Si nos limitamos a las tres cámaras, sin tener en cuenta las WSB, esta comunicación se realiza con las válvulas de los conductos principales (“Culvert Valves”).

Los conductos hidráulicos principales comunican las tres cámaras, pasando por debajo de las compuertas en la zona de los garajes. Están ubicados dentro de los cajeros de las cámaras del Tercer Juego de Esclusas que están formados por sendos muros de hormigón. Los cajeros son monolitos construidos en hormigón armado de elevada resistencia,

baja permeabilidad y alta durabilidad (100 años). Los muros de las cámaras presentan dos tipos de hormigones, uno en masa que maciza el núcleo de los monolitos (*Internal Mass Concrete*), y otro estructural, de alta resistencia a medios marinos y muy baja permeabilidad (*Structural Marine Concrete*) que recubre toda la superficie de la estructura. Los muros tienen una altura aproximada de 30 m sobre cimientos y una anchura en la base de unos 27 m. Su perfil triangular recuerda al de una presa, pero en este caso, cuentan con un núcleo prominente en la base, que alberga los conductos hidráulicos, como se ha indicado arriba. El trasdós del muro está en contacto con un relleno de suelo seleccionado hasta coronación. En la figura 8 se incluye una sección transversal de dicho muro con los conductos hidráulicos mencionados.

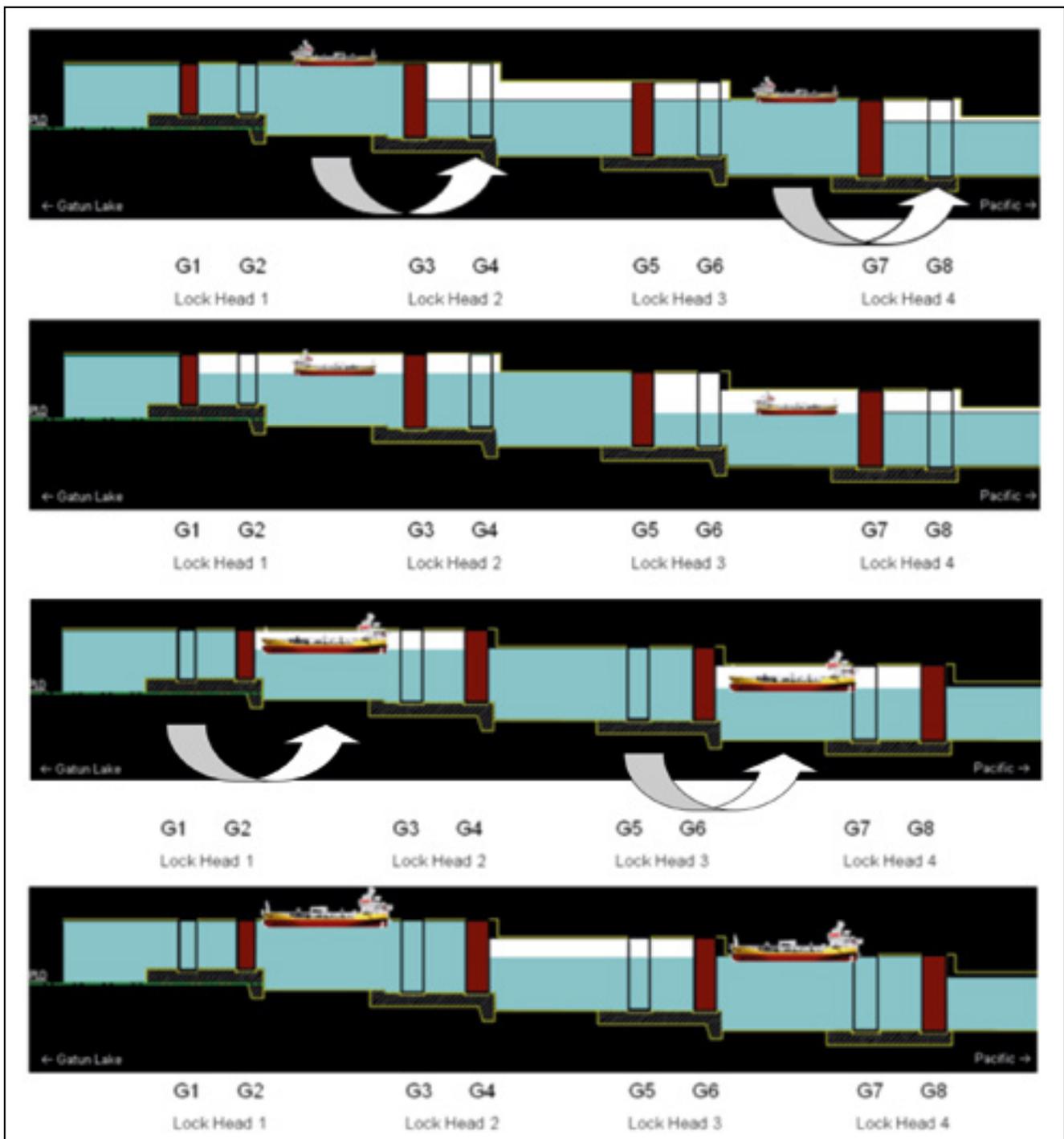


Figura 7. Principio de funcionamiento de las cámaras como vasos comunicantes.

Durante esta operación, el agua empleada no depende del tamaño del barco ya que el volumen necesario depende del área de las cámaras y de la diferencia de nivel entre ambas. Si el área de las cámaras no puede ser modificada, la diferencia de nivel sí puede ser reducida mediante la utilización de las tinas de recuperación de agua (WSB). Estas cámaras no son muy diferentes a las principales, pero colocadas a elevaciones intermedias nos permiten reducir el gasto de agua. Cada vez que el nivel de una cámara debe

bajar se utilizan las tinas laterales, llenando sus tres niveles de forma decreciente. Cada vez que sea necesario volver a llenar la cámara, se comunicará con las tres tinas de ahorro de agua en orden creciente y éstas devolverán el agua necesaria. Antes de que el barco pueda pasar, se ejecutará una última equalización entre cámara y cámara, pero a niveles hidráulicos mucho más parecidos y con un gasto de agua mucho menor. Con esta maniobra se habrá ahorrado el 60% del agua necesaria para el esclusaje.

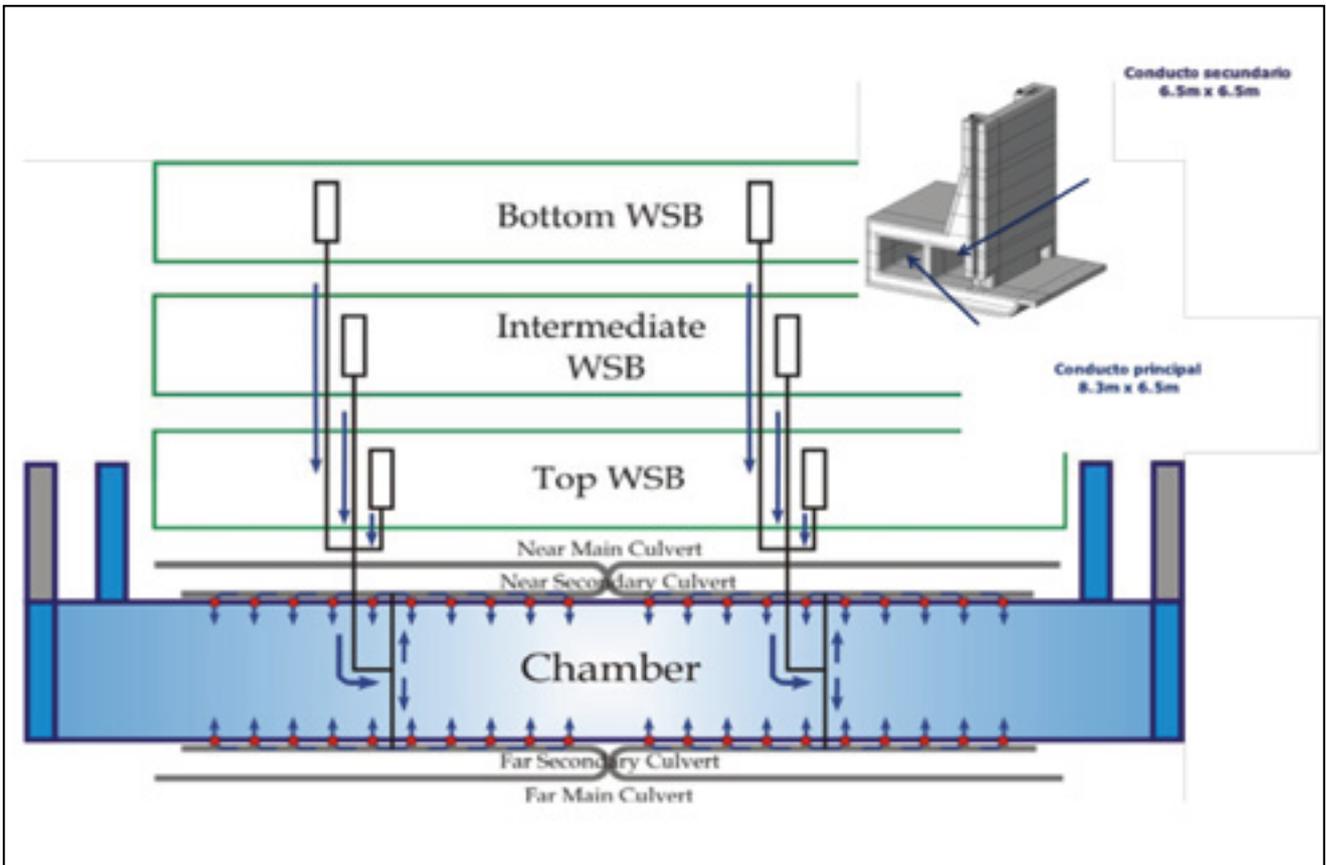


Figura 8. Vista en planta de los conductos principales (culvert) y las WSB (tinas de recuperación de agua).

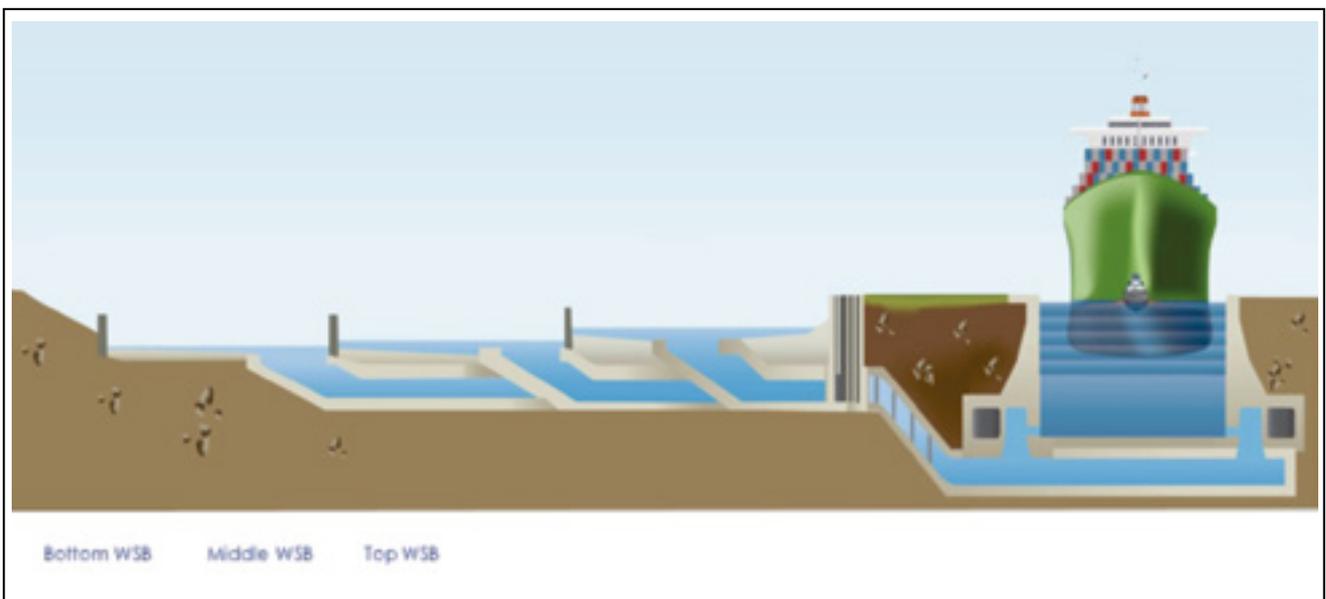


Figura 9. Sección transversal de las tinas de recuperación de agua (WSB).



Figura 10. Imagen aérea de las tinas de recuperación de agua (WSB).

Hagamos un ejemplo práctico. Imaginemos que un barco esté bajando desde el lago y ya se encuentre en la cámara superior. Por comodidad, pero también es una condición que podría presentarse, digamos que la cámara superior esté a elevación 27 metros y la cámara media esté a 7 metros. Si comunicáramos las dos cámaras directamente se equilibrarían a 17 metros. El barco bajaría 10 metros, pero se utilizarían aproximadamente $430 * 55 * 10 = 247.500 \text{ m}^3$ de agua. Si usamos las tinas WSB, procuraremos dejar las tinas de la cámara superior vacías, y las de la cámara media llenas entonces antes de bajar el buque. En este caso, las tinas de la cámara superior deben estar a un nivel de 23 m, 21 m y 19 m respectivamente. Equilibrando en secuencia la cámara superior con las tinas desde la alta a la más baja, ésta bajará de $27 \Rightarrow 25\text{m}$, de $25 \Rightarrow 23\text{m}$, de $23 \Rightarrow 21\text{m}$. Para la cámara intermedia los niveles serían 15 m, 13 m y 11 m para que la cámara se llene, desde la tina más baja a la más alta, de $7 \Rightarrow 9\text{m}$, de $9 \Rightarrow 11\text{m}$, de $11 \Rightarrow 13\text{m}$. Equilibrando una cámara con la otra, el salto ya no sería de 20 metros,

sino de $21 - 13 = 8 \text{ m}$, el nivel de equilibrio queda en 17 m, pero con el gasto de agua de 4 metros ($21 \Rightarrow 17\text{m}$), lo que representa $430 * 55 * 4 = 94.600 \text{ m}^3$, un 40% de lo que se habría gastado sin el uso de las tinas. Para la operación del siguiente barco, las tinas que se vaciaron se volverán a llenar y las que se llenaron devolverán el agua necesaria.

Ésta es la teoría. En la práctica nos enfrentamos a una tarea titánica ya que cada cámara mide 430 metros de largo y 55 metros de ancho y las cámaras tienen que equilibrarse en 10 minutos sin el uso de las tinas y en 17 minutos si se decide ahorrar agua.

Los conductos que comunican las dos cámaras adyacentes (main Culvert en la figura 8), miden 6.5 m de alto y 8.3 m de ancho, dimensiones equivalentes a un túnel ferroviario. La velocidad del agua puede llegar a un máximo de 8 m/s representando un caudal de $430 \text{ m}^3/\text{s}$.

El sistema de llenado y vaciado es controlado mediante 76 válvulas en cada esclusa específicamente diseñadas para trabajar en estas condiciones. Las principales miden



Figura 11. Ensayo de cierre de emergencia de válvulas en condiciones controladas.

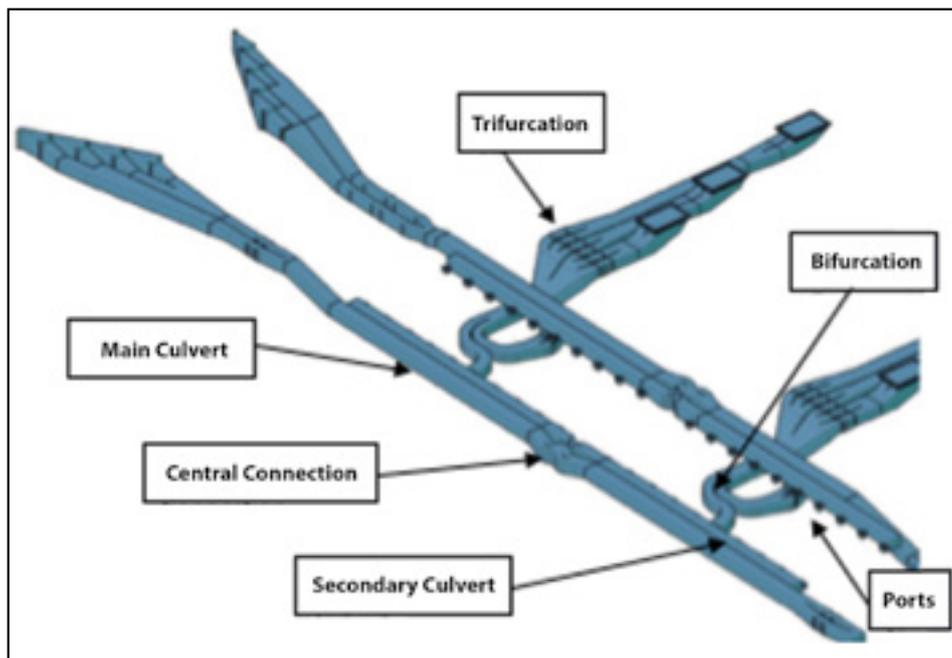


Figura 12. Representación esquemática de los conductos en la cámara superior.

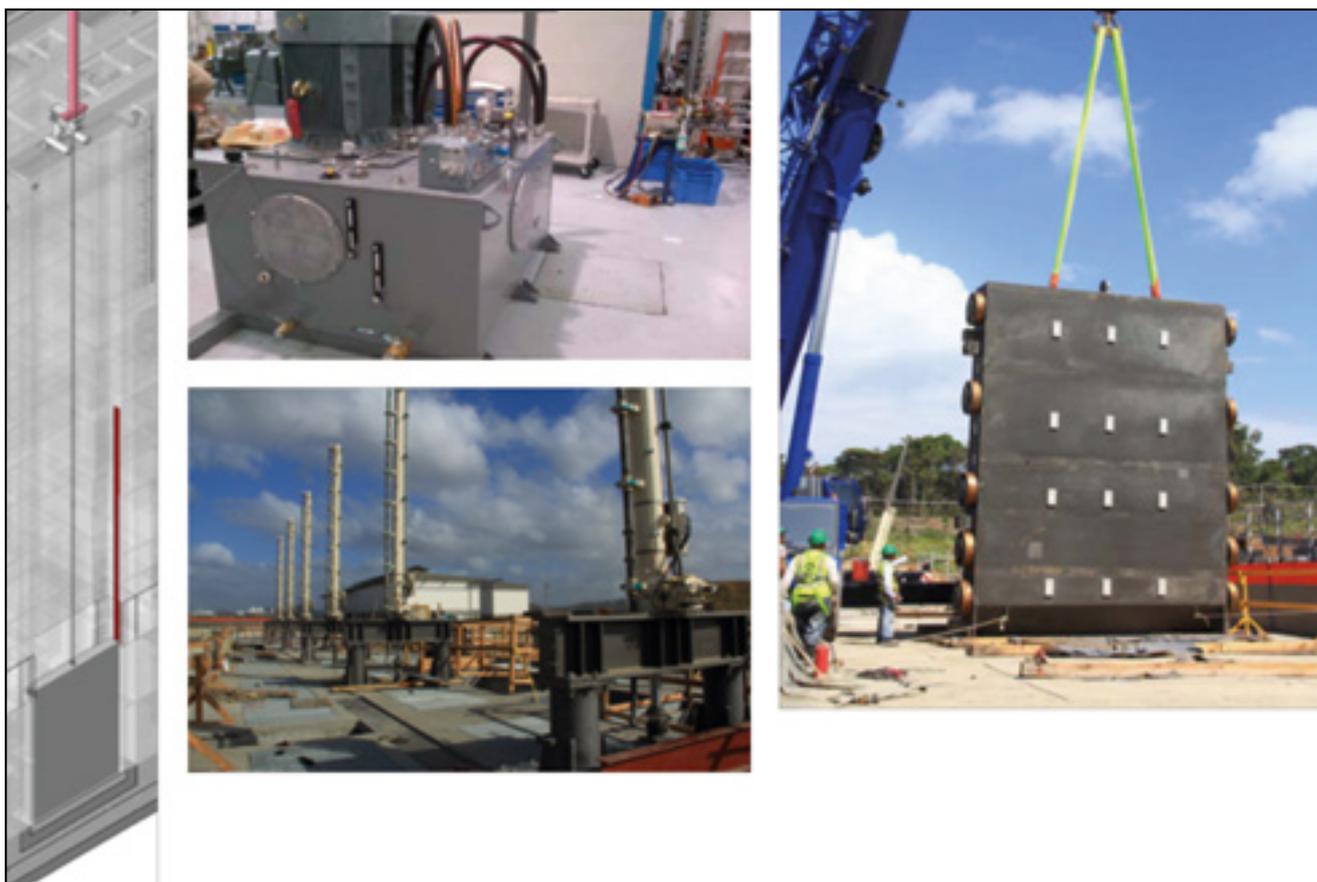


Figura 13. Elementos mecánicos principales del sistema de llenado y vaciado: válvulas, cilindros y centrales de potencia hidráulica.

5.3 metros de ancho y 7.12 de alto y pesan 31 toneladas. Las válvulas deben abrirse venciendo el diferencial hidráulico, que puede llegar a ser superior a 40 metros, evitando los fenómenos de cavitación, vibraciones excesivas o entradas de aire en el sistema. Adicionalmente, el sistema de control permite el cierre de las válvulas por sí solas en caso de fallos operativos. No obstante, este movimiento debe ser extremadamente controlado para evitar golpes de ariete que podrían tener consecuencias catastróficas.

Mientras que las válvulas permiten el paso del agua, la particular configuración de los conductos garantiza que el flujo sea distribuido de forma uniforme en toda la esclusa.

El agua que sale de las válvulas sigue el conducto principal (main culvert) hasta el centro de la cámara. En este punto no puede seguir, ya que las válvulas al final del ducto (que permiten el paso a la siguiente cámara) están cerradas. Aquí hay una conexión con el conducto de 6.5 m x 6.5 m (Secondary Culvert) que la distribuye a lo largo de

toda la esclusa de forma uniforme. Este conducto presenta 20 puertos de 2mx2m que comunican directamente con la cámara a modo de difusores (ver figura 12).

Por simetría de flujo se disponen dos conductos principales, uno en cada lado del canal. En cada conducto se instalaron 2 pares de válvulas en paralelo. Si por razones de mantenimiento una válvula no puede ser cerrada, hay una

en serie que puede ser utilizada. Si un lado no puede ser abierto, entonces el lado adyacente permite que las operaciones sigan de forma ininterrumpida.

Si el desafío principal en el uso de las válvulas en los conductos principales son sus elevados caudales, el desafío de las válvulas que comunican con las tinajas de recuperación es el de brindar un flujo simétrico entre los dos lados



Figura 14. Vista interior del culvert secundario.

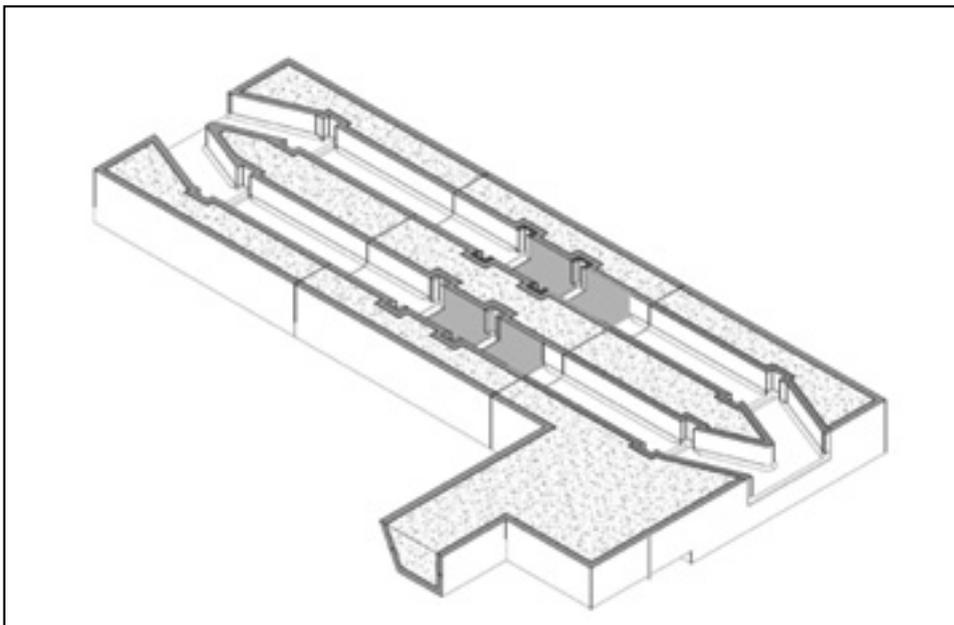


Figura 15. Sección típica del área de válvulas en el conducto principal (culvert).

del canal. Con este objetivo, en cada grupo de tinas de recuperación de agua, se han construido dos estructuras de válvulas. En cada una de éstas, se instalan 2 válvulas para cada tina de dimensiones parecidas a las culvert. Son en total 6 válvulas para cada estructura de válvulas.

En obra, las tinas cuentan con un relleno de suelo competente en el que se definen las pendientes de los bordes y unas pistas para el tránsito de vehículos de mantenimiento (ver figura 10). El conjunto está impermeabilizado con una geomembrana de PVC de 3 mm de espesor en las pistas y 2,5 mm en el resto de la superficie. La puesta en obra se realiza mediante la práctica de acanaladuras en el suelo que, tras el extendido del geotextil, son cubiertas con hormigón. Esta maniobra tensa la membrana y la fija al terreno. Las tinas están divididas en dos cubetas independientes. En el centro de cada cubeta se localiza un enorme sumidero que se conecta bajo tierra con el elemento de distribución denominado trifurcación mencionado arriba. Este dispositivo, en forma de tobogán, tiene en cabecera 3 juegos de bifurcaciones, uno para cada media tina, o cubeta. En total, dos trampolines de

trifurcación por cada cámara, con seis entradas posibles cada uno de ellos, gestionadas mediante un sistema de válvulas. Cada trampolín proyecta el agua con una pendiente de 45° por debajo las galerías longitudinales de las cámaras y bajo su solera se bifurca en dos ramales que conectan ortogonalmente con un sumidero situado en el conducto secundario de cada cámara, desde donde finalmente llega a la cámara.

Podríamos decir que el sistema de llenado y vaciado es el Canal de Panamá. El corazón pulsante de la obra. Los esfuerzos dedicados en el desarrollo de este sistema fueron inmensos. Si algo no hubiera funcionado como era previsto, muy poco se podría haber hecho para solucionarlo. No obstante, este sistema es extremadamente particular. La cantidad de agua manejada en cada operación no tiene rival en el mundo, y el tiempo disponible para cada operación extremadamente breve. Los elementos principales son parecidos a otros canales con tinas de recuperación, pero ninguna lleva al límite la tecnología existente como el tercer juego de esclusas. Grupo Unidos por el Canal y todas las empresas involucradas pronto nos

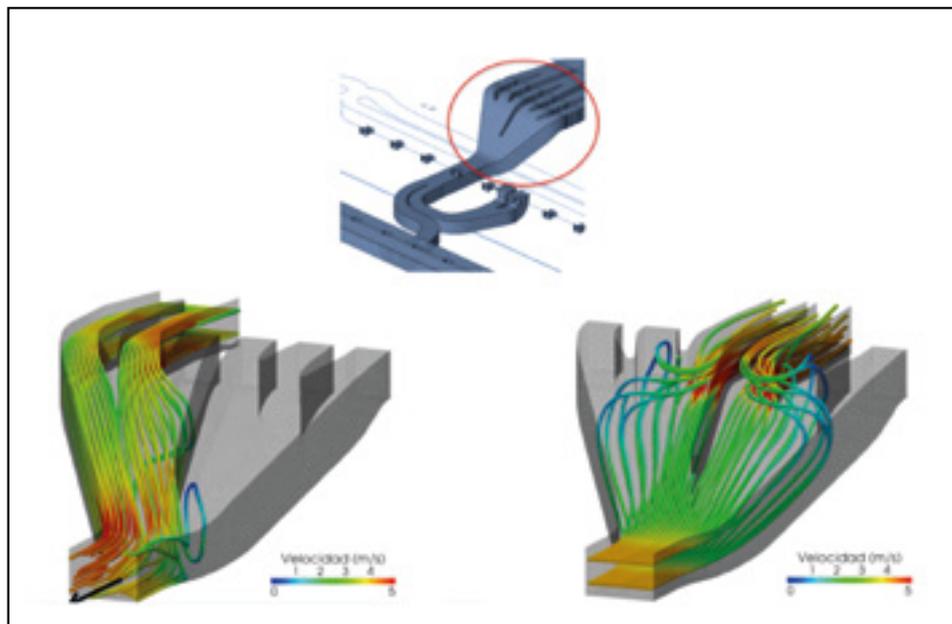


Figura 16. Estudio hidráulico del flujo en las trifurcaciones de las WSB.



Figura 17. Imagen de una trifurcación desde su punto más bajo.

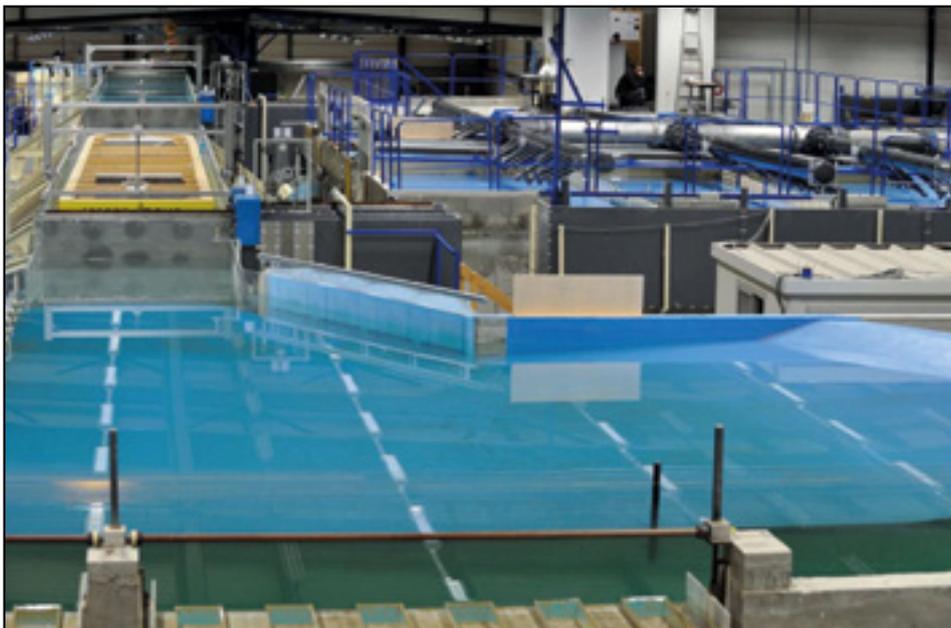


Figura 18. Modelo físico del tercer juego de esclusas en Lyon (Francia).

dimos cuenta que lo aprendido en aplicaciones parecidas aquí no era suficiente.

Los modelos numéricos y los modelos físicos fueron de vital importancia para el éxito del proyecto. Cada solución se investigaba en un modelo simplificado 1D, para luego ingresar los datos en modelos 3D en puntos específicos. El nivel de detalle y la complejidad del fenómeno, impiden a los modelos analizar el flujo en todo el sistema. Los superordenadores disponibles tomaron días en resolver las ecuaciones que describen el flujo del agua. Obviamente, cada solución fue puesta a prueba en un modelo físico construido en Lyon (Francia) en escala 1/30. El modelo era una esclusa en sí mismo. Este modelo no solamente permitió validar las soluciones hidráulicas mucho antes de la construcción, pero también estimar efectos muy difícilmente evaluables con métodos numéricos, como las corrientes de salinidad que se forman en el océano o la influencia que tiene la estructura de aproximación en este flujo. El modelo físico se monitorizó con más de 100 sensores que proporcionaban datos de niveles de agua, velocidades, presiones, diferencias de elevación

en la cámara, fuerzas ejercidas al buque durante el proceso de esclusaje y posición óptima de las válvulas. Las correlaciones obtenidas entre el modelo físico y el numérico fueron muy altas, de tal manera que se ha podido controlar muy bien la distribución de flujos en cada sección crítica del modelo.

Los estudios fueron muchos, miles las horas frente al ordenador esperando resultados, pero todos tuvimos un gran alivio cuando se logró el primer esclusaje, la primera ecualización y todo salió mejor de lo que estaba previsto.

4. SISTEMA DE COMPUERTAS

Las compuertas del tercer juego de esclusas son de tipo “deslizante”. Se desplazan utilizando un carro superior y un carro inferior con ruedas sobre unos carriles ubicados en dichas zonas.

Este tipo de compuerta tiene varias ventajas respecto a las compuertas con bisagras del canal original. Una de ellas es la utilización del nicho donde se ubican en posición



Figura 19. Vista general de una compuerta en operación.



Figura 20. Vista general de la estructura donde se ubican las dos compuertas en cada extremo de cámara.

abierta como dique seco para dar mantenimiento a la compuerta sin tener impacto en las operaciones.

Cada esclusa presenta 3 cámaras para que el salto de aproximadamente 27 metros desde el mar al lago se divida en 3 escalones de 9m cada uno. Esto requiere de cuatro de estas estructuras situadas en el extremo de cada cámara, espacio en que se coloca cada par de compuertas. Las compuertas van en pares precisamente por razones de redundancia y mantenimiento. Si una de las dos se encuentra en el nicho y no puede ser utilizada, la hermana permite que las operaciones sigan sin problemas. También hay razones de seguridad y, por esta razón, cuando el buque está en movimiento siempre hay dos compuertas cerradas al frente.

La entrada desde cualquiera de los dos océanos encuentra su primer par de compuertas –la 7 y la 8- al inicio de la primera cámara, la inferior –*Lower Chamber*-. Estas compuertas independizan el sistema de las carreras de marea oceánicas, muy acusadas en Pacífico, donde alcanzan los seis metros de diferencia, y más moderadas en Atlántico, con 1 metro de desnivel aproximadamente. El siguiente par de compuertas – 5 y 6- se sitúa unos 9 metros por encima de las anteriores, al inicio de las cámaras intermedias –*Middle Chambers*-. La tercera pareja -3 y 4-, idénticas a las anteriores, se encuentra al comienzo de la cámara superior –*Upper Chamber*-, que vuelve a elevarse cerca de 9 metros respecto a la intermedia. El último par de compuertas -1 y 2- separan el sistema de esclusas del Lago Gatún, cuya lámina de agua en condiciones ordinarias se encuentra unos 27 metros sobre el nivel de referencia de ambos océanos.

Existen seis modelos diferentes de compuertas dependiendo de su ubicación:

- Compuertas del complejo atlántico:
 - Modelo A: compuertas 1 y 2, situadas junto al Lago Gatún. Sus dimensiones son 57.6 m de largo, 8 m de ancho por 22,30 m de altura. Su peso es de 2.100 toneladas. Fueron desembarcadas en el muelle de Colón en el segundo viaje desde el puerto de Trieste (Italia), en junio de 2014.
 - Modelo B: compuertas 3, 4, 5 y 6. Son compuertas mucho más grandes que las anteriores. Tienen 57.6 m de largo, 10 m de ancho y 30,19 m de alto. Su peso es de 3.300 toneladas, y se trajeron en el primer viaje, en agosto de 2013.
 - Modelo D: compuertas 7 y 8. Algo menores que las anteriores -10 m por 29,07 m- son, sin

embargo, más pesadas, con 3.100 toneladas. Llegaron a muelle en noviembre de 2014, en el cuarto y último viaje.

- Compuertas del complejo pacífico:
 - Modelo C: compuertas 3, 4, 5 y 6. Llegaron en el segundo y tercer viaje respectivamente, es decir, en junio y septiembre de 2014. Sus dimensiones son 57.6 m de longitud, 10 m de ancho por 31,92 m de alto. A pesar de no ser las más grandes de todas, son las más pesadas, con 3.900 toneladas.
 - Modelo E: compuertas 7 y 8, situadas a la entrada del Pacífico son las compuertas de mayores dimensiones de las 16 fabricadas. Tienen 10 m de ancho por 33,04 m de altura. Pesan algo menos que las anteriores, 3.600 toneladas. Llegaron a muelle en el cuarto viaje, en noviembre de 2014.
 - Modelo F: compuertas 1 y 2. Tienen las mismas dimensiones que las compuertas homónimas del Atlántico, 8 m de ancho por 22,30 m de altura, pero son algo más pesadas que aquellas, con 2.300 toneladas. Llegaron al muelle de Colón en septiembre de 2014, en el tercer viaje de los cuatro realizados.

Las compuertas presentan diferentes dimensiones y pesos en función de las condiciones de contorno que determinan su flotabilidad. En efecto, las compuertas son paralelepípedos ortogonales, que presentan cámaras huecas y estancas, dispuestas en cada caso a la altura necesaria y con las dimensiones precisas para reducir los pesos muertos y permitir su flotabilidad. Estas cámaras estancas funcionan como el casco de un barco, reduciendo el peso en operación de las compuertas hasta en un 85% de su peso en seco para poder deslizarlas. De esta forma la fuerza vertical total que los vagones de las compuertas deben soportar no supera las 600 toneladas en total.

La construcción de las compuertas se realizó completamente en Italia e involucró el trabajo de 5 talleres diferentes durante 36 meses. Todas las compuertas han sido transportadas completamente montadas desde el puerto de Trieste hasta un muelle construido únicamente para esta función en el lado Atlántico. En cada viaje que cubría los más de 11.000 km desde el Mediterráneo hasta Panamá se transportaron 4 compuertas en unos buques de carga pesada. Dichos buques alcanzaban velocidades



Figura 21. Vista interior del pasillo que da acceso a las cámaras de flotación de una compuerta.

de unos 13 nudos y tenían unas dimensiones en manga que no permitían su paso por el Canal de Panamá original.

Las compuertas del Pacífico fueron descargadas en el lado Atlántico para su trasbordo posterior a una barcaza tipo panamax que cruzó el Canal de Panamá original con una compuerta en cada viaje. También se construyó un muelle específico a ese lado del Istmo para recibir las compuertas, el cual fue demolido posteriormente.

Las operaciones de fabricación y transporte de las compuertas han sido, por su complejidad y espectacularidad, una de las imágenes que más seguimiento mediático han tenido en la ejecución de esta obra. Para estas operaciones se ha contado con el empleo de carros de transporte de carga pesada autopropulsado (SPMT), barcazas con decenas de bombas capaces de compensar la transferencia de carga y con dos buques de transporte oceánico de cargas pesadas adaptados al presente proyecto.



Figura 22. Vista general del taller de montaje final de las compuertas.



Figura 23. Desembarque de las compuertas en el muelle del lado Atlántico.



Figura 24. Almacenamiento y transporte de las compuertas hacia su ubicación definitiva.



Figura 25. Diferentes fases de la instalación de la compuerta mediante carros de transporte especiales.

Cada compuerta está sostenida por dos vagones. Uno se mueve a lo largo del nicho en la estructura de hormigón, en la parte más elevada, y por esto se define como vagón superior. Este vagón se encarga de transmitir el movimiento a la compuerta a través de una viga donde están ubicadas las poleas, como veremos más adelante. En el otro extremo de la compuerta, el vagón está situado en la parte más baja de la compuerta y rueda sobre un carril colocado en el fondo de la cámara. Para facilitar su mantenimiento, el punto de conexión entre el vagón inferior y la compuerta está ubicado en la parte más alta de la compuerta, afuera del agua, y la compuerta se apoya sobre él mediante una columna. De esta forma se elimina la necesidad de complicados buceos en el canal para la extracción del vagón previstos cada 5 años.

El movimiento de las compuertas se realiza con cables y poleas, en forma muy parecida a una cortina de nuestros hogares, tal y como se muestra en la figura 28. Los cables que cierran cada compuerta pasan por el tambor, varias poleas, cruzan la compuerta por la viga de soporte de las poleas y regresan a un punto fijo. Tirando de este cable, la compuerta se desliza hacia el centro de la cámara. Para abrirla, el cable viene desde el edificio de maquinaria, cruza la viga de soporte de las poleas y regresa a un punto fijo en el mismo edificio. Tirando de este segundo cable la compuerta se desliza hacia el interior del nicho. El mecanismo de tracción incluye cabrestantes accionados eléctricamente sobre los que se enrollan dichos cables de acero, de apertura o cierre.

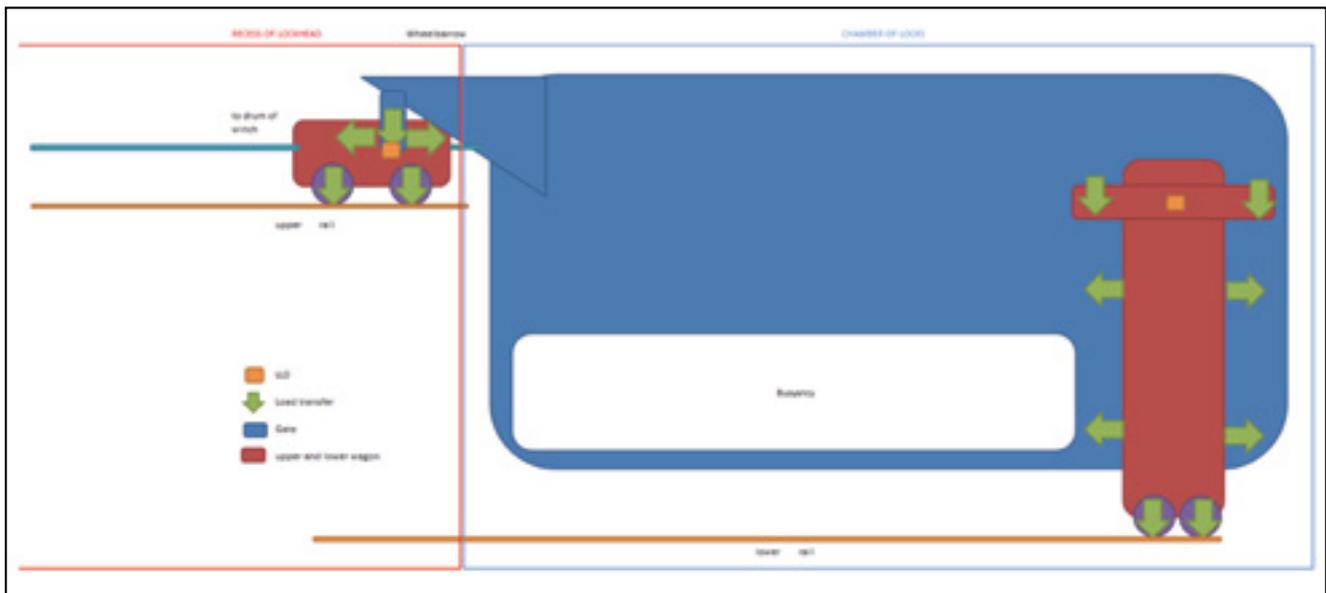


Figura 26. Esquema conceptual de funcionamiento de las compuertas.



Figura 27. Vista del vagón inferior.

En este caso lo que complica el sistema es la particular redundancia requerida, la simetría de carga necesaria, y la extensión que los cables sufren a lo largo del tiempo.

El primer problema se resuelve utilizando 2 cables para cada movimiento. Todo el sistema está duplicado para que,

en caso de que uno de los dos falle, el segundo sea capaz de abrir la compuerta y permitir las operaciones de esclusaje.

La simetría de la carga viene resuelta mediante la configuración del cable ("cruzando" la compuerta), lo cual permite evitar desequilibrios entre ambos lados del vagón.

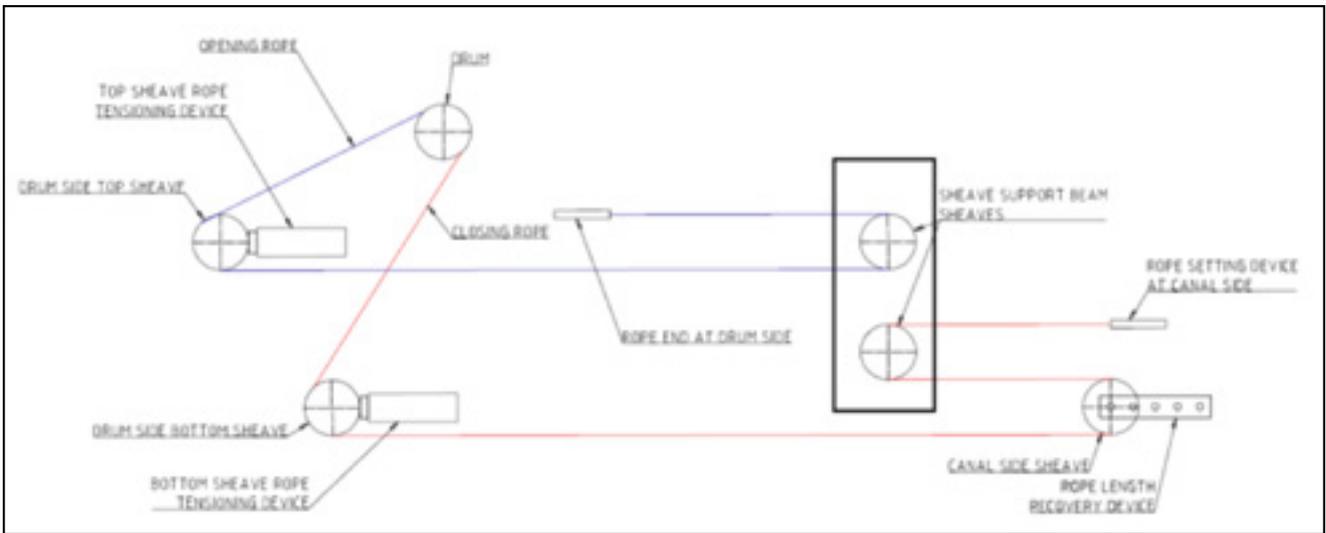


Figura 28. Esquema general de los cables de tracción de la compuerta.

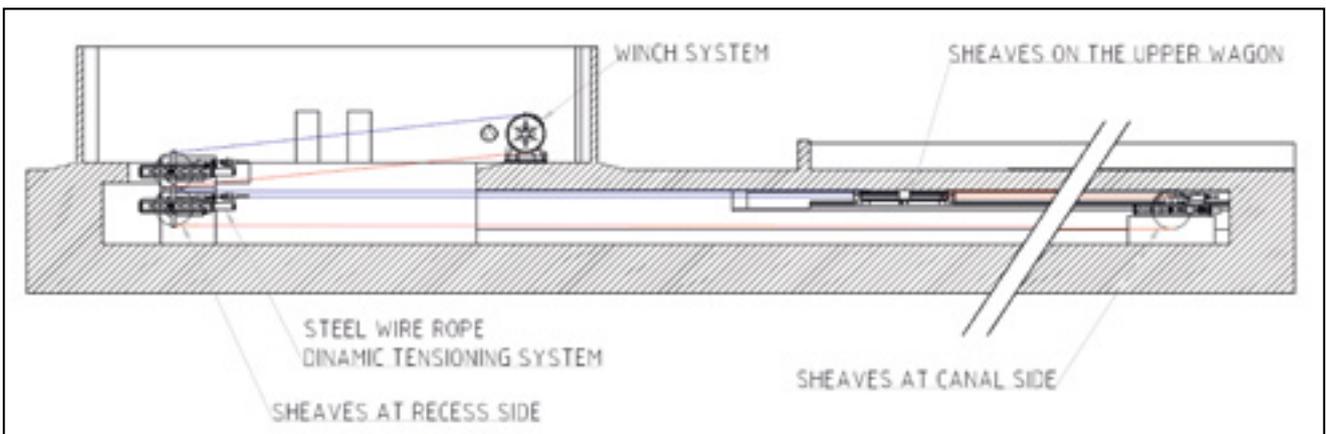


Figura 29. Perfil transversal con el esquema general de los cables de tracción de la compuerta.

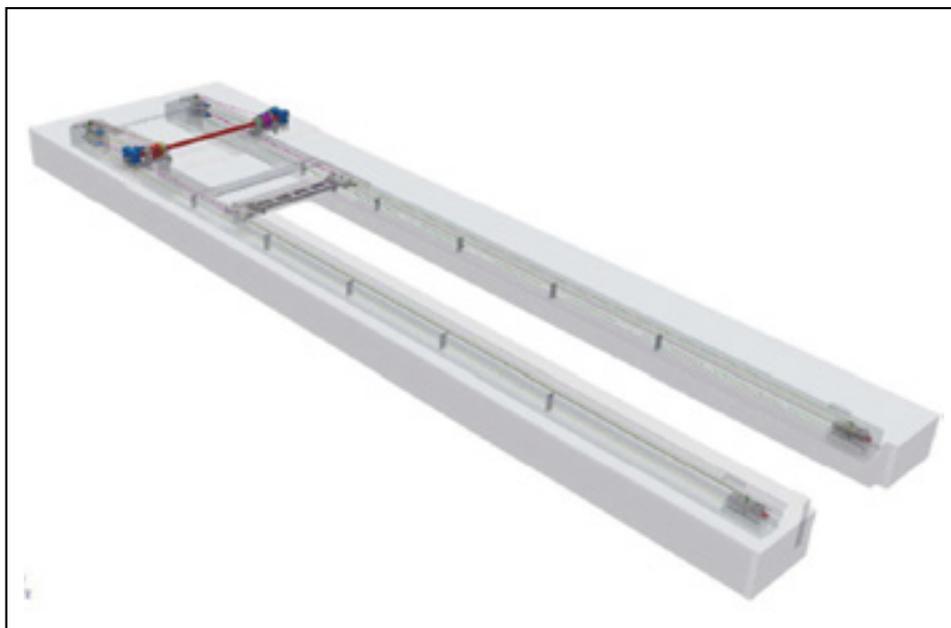


Figura 30. Perspectiva con la maquinaria de tracción y el carril superior de la compuerta.



Figura 31. Vista de la viga de soporte de las poleas.

Varias de las características descritas en este punto parecen ser comunes a muchas otras esclusas, no obstante, en el contexto del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá, muchos son los problemas nuevos y las soluciones particulares que se deben implementar.

El diferencial hidráulico es una de las mayores características distintivas del Canal de Panamá. Muy pocos sistemas de esclusas en el mundo prevén estos niveles de agua, y ninguno en conjunto con una cámara tan grande. A esto, hay que sumar los requerimientos sísmicos, de estanqueidad y durabilidad. La solución finalmente implementada nunca se ha utilizado anteriormente y presenta varios

elementos prototipo que representan importantes innovaciones. El sistema de sellado es uno de ellos. La principal función de las compuertas es crear una separación entre dos cámaras para permitir el ascenso y descenso de los buques. Para ello deben ser capaces de sellar adecuadamente contra la pared de hormigón. En la mayoría de esclusas parecidas, que separan zonas fluviales y marítimas, las fugas no son un factor relevante.

En el caso del Canal de Panamá los requerimientos de estanqueidad y durabilidad son extremadamente exigentes. Los sellos tienen que garantizar una fuga menor a 5 litros por minuto por metro y una vida útil de 15 años o



Figura 32. Vista general del perfil de sellado de la compuerta.

135.000 ciclos, operando más de 20 veces al día. Casi todas las compuertas de este tipo en el mundo trabajan con las mareas, de 2 a 4 veces por día. Una solución bastante común es un soporte de madera con una lámina de plástico montado en la compuerta y un apoyo de hormigón liso o de piedra natural en el que se apoya y sella. Esta solución no podía garantizar las prestaciones requeridas y fue necesario analizar otras alternativas. La que se adoptó finalmente consiste en un sello de caucho en forma de nota musical (“J-seal”), independiente de otras funciones, que se activa con el diferencial hidráulico y se desactiva cuando se alcanza el equilibrio. Esta solución es más común en válvulas de represas o diques secos. Varias pruebas fueron

necesarias para asegurar que la rigidez del perfil fuese la correcta. Un perfil demasiado rígido no se activaría a tiempo, mientras que uno demasiado suave podría quedar activado con diferencias de niveles de agua suficientes para mover la compuerta, con el riesgo de dañarlo.

El sistema de guiado de la compuerta es también innovador y consiste en paneles de polietileno de alta densidad fijados a la pared de hormigón de manera que sellen uno contra el otro. De esta forma cubren dos funciones. La primera es la de brindar una superficie muy regular para que el sello de caucho cierre correctamente, por otro constituyen un soporte de muy baja fricción y resistencia al desgaste para que los soportes de la compuerta se deslicen con poco esfuerzo.



Figura 33. Vista general de los bloques de soporte y guiado de la compuerta.

Otro elemento que hace estas esclusas muy particulares son los niveles hidráulicos que pueden existir en cada compuerta. Como se mencionó anteriormente el salto de nivel entre dos cámaras adyacentes puede llegar a ser de 20 metros. Las elevadas cargas de fatiga derivadas del uso de las compuertas también han sido un condicionante de su diseño. Finalmente, para que la flotabilidad de las compuertas no se vea afectada por los cambios de nivel, la cámara de flotación debe situarse en el punto más bajo de la compuerta. Este hecho implica que el diseño de la estructura esté muy penalizado respecto a otras compuertas en el mundo.

Todos estos elementos hacen que la estructura de la compuerta deba ser extremadamente resistente. Cada

detalle fue analizado a fondo y optimizado. En estructuras tan grandes y con tan poco tiempo de fabricación las conexiones suelen ser relativamente sencillas, para una rápida construcción. En el Canal de Panamá resultaron particularmente complicadas, con muchísimo trabajo manual y exigentes inspecciones en las soldaduras.

Otro problema que se debió resolver son los requerimientos de resistencia frente a sismos. Si es muy común aplicar criterios sísmicos a los edificios alrededor del mundo, muy pocas veces se implantó en compuertas para esclusas. Tan particular es esta aplicación que no habían estudios en literatura para estimar la interacción entre la estructura de la compuerta y el agua que la rodea.



Figura 34. Vista del interior de la compuerta en la zona sobre la cámara de flotación.

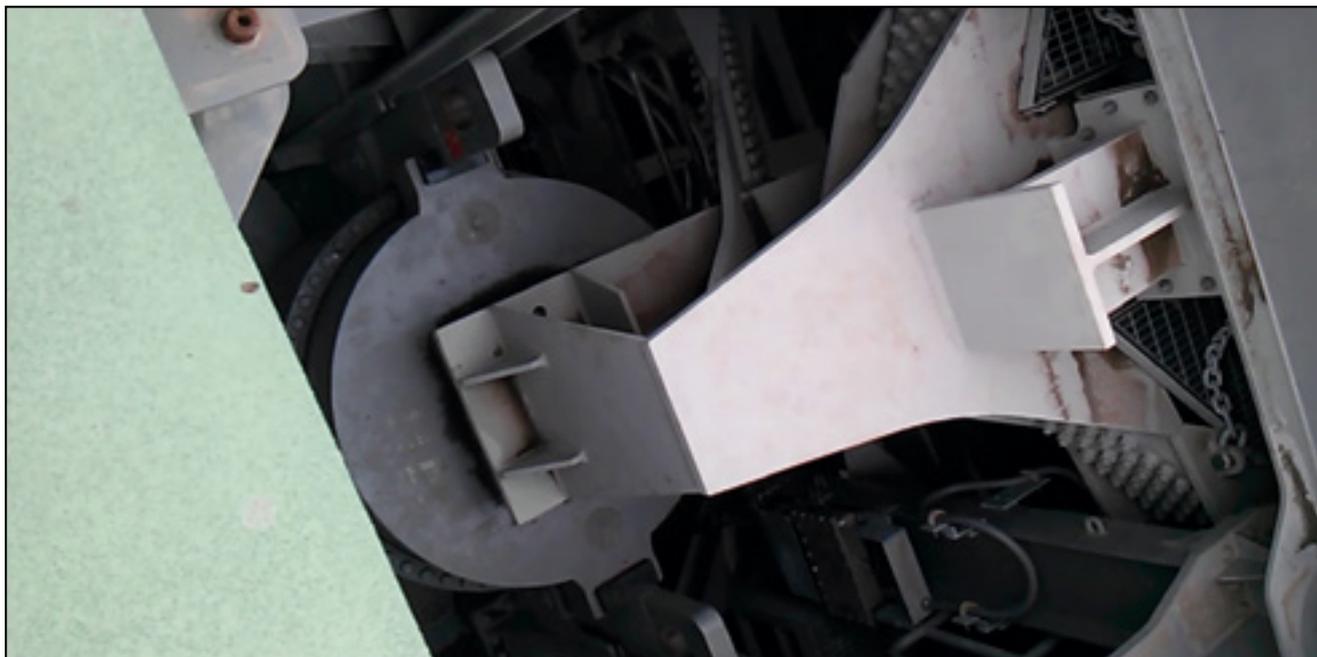


Figura 35. Vista del dispositivo de limitación de carga (LLD) del carro superior de la compuerta.

Se hicieron pruebas experimentales en esclusas de dimensiones parecidas para evaluar estas fuerzas. El resultado obtenido hizo necesario un dispositivo que limitase la carga transmitida a los vagones en estas condiciones (Load Limiting Device, LLD). Este dispositivo funciona como un resorte con la correcta rigidez que permite que la compuerta se apoye en la solera de la cámara en caso de aceleraciones verticales y cargas excepcionales, evitando así daños en los mecanismos y en las ruedas sobre las que se desplaza (ver figura 35).

Todas las compuertas están provistas de una pasarela peatonal en coronación para permitir el acceso a través de las cámaras de las esclusas. Del mismo modo, cuentan con galerías verticales de inspección que recorren la compuerta y permiten acceder a las cámaras estancas en caso de necesidad. Las compuertas están dotadas en diversos sistemas y servicios auxiliares, tales como iluminación general y de emergencia; lastre; sistema de trimado para evitar el cabeceo durante su desplazamiento, del mismo modo que se hace en los buques; sistemas de detección de gases; comunicaciones; control de carga; limpieza de lodos; ventilación, etc. En total, se han instalado más de 80.000 m de cable y unos 8.000 m de tuberías en su interior.

Durante las operaciones de mantenimiento, el nicho de las compuertas se aísla de la cámara de las esclusas mediante una mampara de cierre. El lastre –agua contenida- de las cámaras estancas de las compuertas se bombea hacia el exterior para permitir su ascenso, y poder apoyarlas en las estructuras de mantenimiento presentes en los nichos de hormigón. Después, el nicho y la compuerta pueden vaciarse para permitir el acceso de operarios y maquinaria y poder así realizar operaciones de mantenimiento en seco.

5. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de Control (PCS) está diseñado para operar de manera segura, confiable y funcional el Tercer Juego de Esclusas. Se divide en dos grandes sub-sistemas:

1. El **LMCS** (Sistema de Control de Maquinaria para la operación de la Esclusa): Este sistema se encarga de operar, monitorear y controlar las válvulas, las compuertas y los sistemas auxiliares.
2. El **EDCS** (Sistema de Control para los Equipos de Distribución Eléctrica): Este sistema se encarga de operar, monitorear y controlar los centros de control de motores, los transformadores, los equipos de corriente directa y resto de equipos eléctricos.

El sistema de control fue diseñado con la finalidad de que la esclusa pudiera ser operada de la manera más confiable, segura y fácil para el operador de la esclusa. Hoy en día, un solo operador en cada esclusa es capaz de operar el sistema de control para lograr el paso de buques por el canal.

Existen tres consolas de operación en ambas esclusas, dos de las cuales están ubicadas en la Torre de Control (CB). El operador puede operar en cualquiera de las tres consolas existentes, las cuales fueron diseñadas con el fin de tener un sistema redundante.

Cada consola cuenta con 17 monitores los cuales se utilizan de la siguiente manera:

1. **MCS** (Estación de Control de Maquinaria): Conformada por 3 monitores los cuales son utilizados para operar la esclusa. Desde estos monitores se puede abrir o cerrar las válvulas y compuertas de la esclusa. Con estas pantallas se realiza la operación de la esclusa.
2. **MDS** (Estación de Diagnóstico de Maquinaria): Conformada por 1 monitor es quizás uno de los monitores de mayor uso en la esclusa. Desde este monitor se puede monitorear cualquier equipo dentro de la esclusa. Se utiliza para diagnosticar fallos de cualquiera de los equipos que están siendo monitoreados, es por esto que es de tan vital importancia. Es un instrumento muy importante al momento de verificar la causa raíz de algún fallo durante la operación de la esclusa.
3. **WLD** (Estación de Nivel de Agua): Conformada por un monitor, desde este monitor se puede ver de ma-

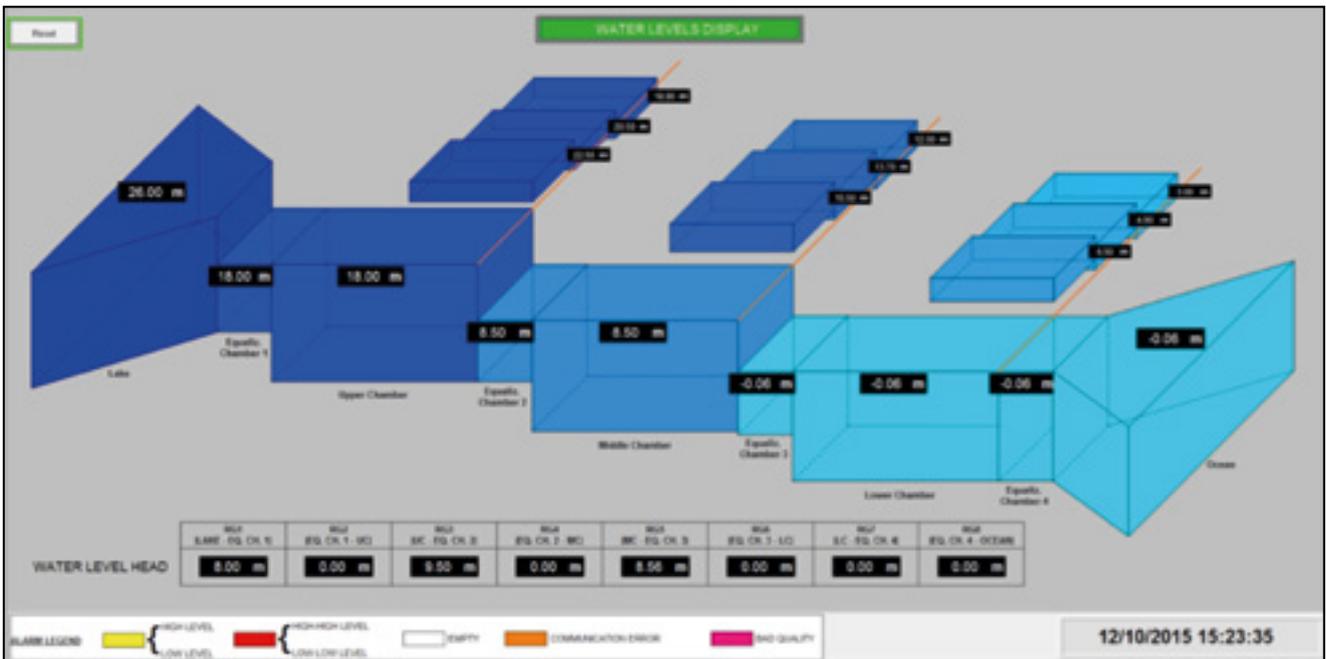


Figura 36. Pantalla del WLD.

- nera tridimensional el estado actual del volumen de agua que se maneja en toda la esclusa.
4. PDS (Estación de Distribución Eléctrica): Conformada por 4 monitores en los cuáles se pueden realizar maniobras eléctricas relacionadas a las líneas de distribución eléctrica que alimenta a la esclusa. Desde 4 monitores se puede ver el estado actual del sistema eléctrico de la planta, también se pueden realizar maniobras para energizar y desenergizar desde un edificio hasta la esclusa en su totalidad.
 5. CCVS: Conformada por 4 monitores los cuales son utilizados para visualizar las diferentes cámaras que forman parte del sistemas de video de circuito cerrado. Con estos monitores el operador observa lo que pasa en tiempo real en toda la esclusa.

6. Fire Fighting: Conformado con un monitor el cual es utilizado para la interfaz del sistema contra incendios de la esclusa.
7. EVTMS (Sistema Mejorado de Administración de Tráfico): Conformada por un Monitor es utilizada para la aplicación de tráfico marítimo.
8. AIS (Sistema de Identificación Automática): Conformada por un monitor, utilizado para la aplicación del sistema de identificación automática.
9. Reporting: Conformada por un monitor es utilizado para la realización de reportes diarios y semanales.

El software utilizado para monitorear, operar y controlar una sola esclusa se encuentra distribuido entre 117 gabinetes de control, los cuales cuentan con un total de 234 PLCs. Existen alrededor de 35,000 señales (entradas y

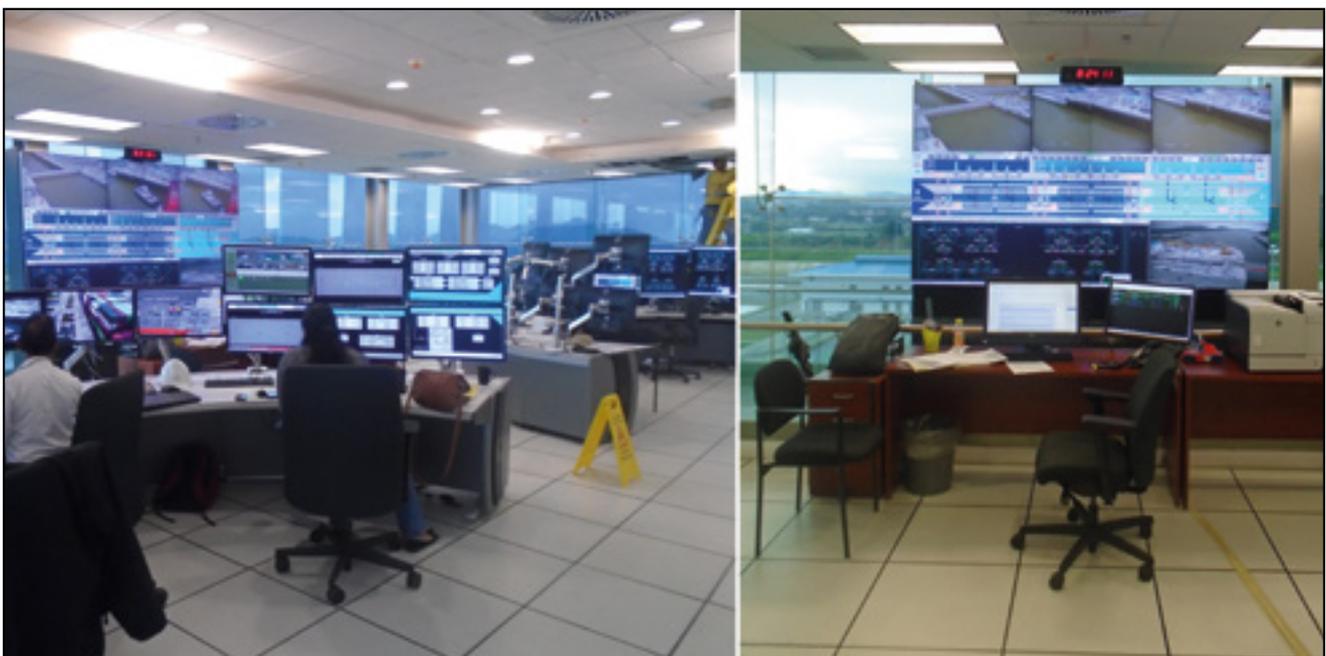


Figura 37. Vista de la Torre de Control.

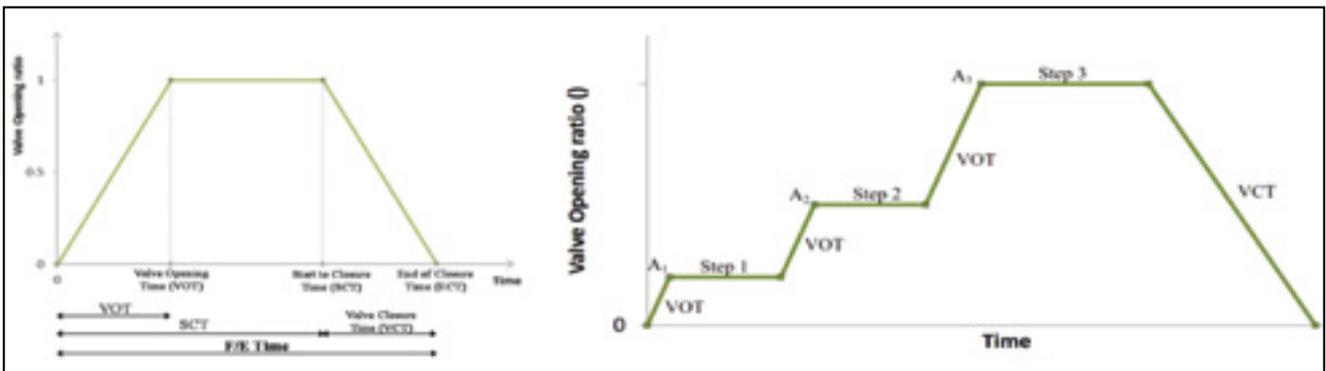


Figura 38. Representación Gráfica del Perfil de Apertura y Cierre de Válvulas.

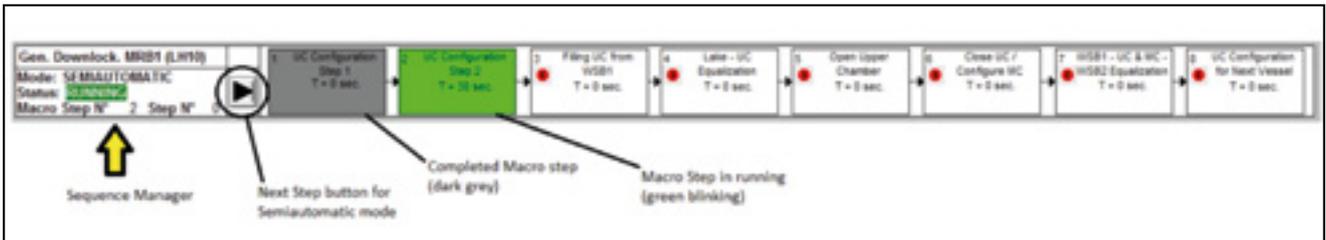


Figura 39. Representación Gráfica de Secuencia Semiautomática.

salidas), de las cuales aproximadamente 10,000 son compartidas mediante cable de cobre para mayor confiabilidad. Además, el operador cuenta con alrededor de 5,000 diferentes pantallas en cada consola para operar y monitorear las esclusas.

Existen diferentes tipos de gabinetes distribuidos en toda la esclusa, los cuales tienen una función predeterminada para cumplir con el diseño de lógica distribuida de la esclusa.

Grupo Unidos por el canal implementó un sistema de operación en el tercer juego de esclusas basado en el tiempo de equalización calculado en base al modelo físico y numérico realizado del sistema y los datos recopilados durante las pruebas de puesta en marcha. De esta manera se han podido obtener los tiempos necesarios de apertura y cierre de válvulas para lograr la equalización de las cámaras. Estos tiempos de apertura y cierre de válvulas dependen de la configuración de las cámaras, las compuertas que estén disponibles, los niveles de agua, la cantidad de válvulas disponibles para realizar la equalización, entre otras variables.

Al momento de operar existen diferentes modos de operación la cual el operador puede utilizar según su necesidad. Existen 5 modos de operación:

1. Automático: El esclusaje es realizado mediante una secuencia ya programada y el operador solo deberá de confirmar al sistema si el barco está asegurado (amarrado) para empezar equalizaciones y si el sistema puede cerrar las compuertas una vez pase el barco.
2. Semiautomático: Es muy similar al modo automático, la única diferencia es que el sistema le pedirá confirmación al operador antes de cada paso a realizar de la secuencia.
3. Control Grupal: Este modo de operación controla solamente un grupo de válvulas ya sean de las tinas de reutilización de aguas o de un Lockhead. También se utiliza para operar un grupo de compuertas,

cada Lockhead está compuesto de dos compuertas y un set de 8 válvulas de las cuales 4 son redundantes. El modo grupal fue diseñado ya que es de vital importancia que los movimientos de agua dentro de las cámaras sean simétricos. En caso de que se creen flujos asimétricos los barcos pueden llegar a chocar contra el muro de la esclusa.

4. Control Individual de Válvula o Control Individual de Compuerta (Emergency Override): Es utilizado para mover individualmente una válvula o individualmente una compuerta. En caso de que haya barco en la cámara no es recomendable usar este modo para equalizar porque hay una posibilidad de que se creen flujos asimétricos en la cámara.
5. Porcentaje de Operación (Control Individual de Válvula): Es utilizado para mover individualmente una válvula seleccionando un porcentaje predeterminado.

El sistema de control fue diseñado con la finalidad de tener un 99.96% de disponibilidad de operación de la esclusa. Esto quiere decir que la cantidad de tiempo en la cual puede estar indisponible dicho sistema es mínima ya que el canal debe de estar operativo 365 días al año. Con lo anterior explicado se puede observar que el sistema de control distribuido tiene una gran flexibilidad al momento de operar y puede ser utilizado según la condición de la esclusa. Además es un sistema diseñado específicamente para el Tercer Juego de Esclusas ya que la misma posee características diferentes a otras esclusas en el mundo.

6. SISTEMAS AUXILIARES

Los sistemas auxiliares corresponden a aquellas funciones complementarias necesarias para la operación del tercer juego de esclusas, tales como los sistemas necesarios para garantizar la seguridad física del Canal, gestionar el tráfico de una manera eficiente y segura por encima de las compuertas, detectar y extinguir un incendio o vigilar la

zona con cámaras térmicas. A continuación se indica qué sistemas se incluyen en cada categoría:

- SISTEMAS DE SEGURIDAD:
 - Sistema de Seguridad Perimetral
 - Sistema de Detección de Intrusos
 - Sistema de Control de Accesos
 - Sistema de Control Vehicular
 - Circuito Cerrado de Televisión
 - Sistema de Megafonía y Evacuación
 - Sistema de detección de incendios
- SISTEMAS DE PROTECCION CONTRA INCENDIOS:
 - Sistema de protección de agua-espuma
 - Sistema de rociadores automáticos
 - Sistema de gas extintor FM200
- SISTEMAS DE RADIO, TELEFONIA Y COMUNICACIONES.
- SISTEMA DE DETECCIÓN DE BUQUES.
- SISTEMA DE MEDICIÓN DE PROCESOS PRIMARIOS.

7. TECNOLOGÍA CONSTRUCTIVA Y DE PUESTA EN MARCHA

En los apartados anteriores se han ido comentando aquellos aspectos donde la tecnología constructiva ha conllevado la necesidad de innovar en los procedimientos implantados. Hay que tener en cuenta además que el tercer juego de esclusas combina una obra civil de grandes volúmenes con elementos propios de una obra industrial también de gran magnitud y de elevada complejidad.

Efectivamente, este proyecto debe ser considerado como un proyecto industrial de gran envergadura con una fase de instalación electromecánica y puesta en marcha muy significativa con los retos propios de cualquier proyecto industrial y algunos propios, debidos a la particular naturaleza del proyecto. Sus dimensiones y las interferencias entre disciplinas y actores plantearon retos que motivaron la adopción de medidas innovadoras y creativas que nos dirigiesen a la consecución de los objetivos marcados. A todo esto hay que añadir que el proyecto en general es un prototipo, así como muchos de sus componentes, por lo que no hay referencias previas ni experiencia en proyectos anteriores de estas características y dimensiones, y este factor en sí ya es un verdadero reto. No sólo reto técnico, sino también reto humano y de gestión de proyecto.

El Tercer Juego de Esclusas consta de equipos electromecánicos ya descritos en los apartados anteriores, como son las válvulas y compuertas, piezas emblemáticas del proyecto, pero también sistemas de distribución eléctrica de media y baja tensión, corriente continua, sistemas de alimentación ininterrumpida, complejos sistemas de control, comunicaciones, seguridad, contraincendios etc. presentes en cualquier proyecto industrial. Todos estos sistemas deben funcionar de forma integrada y perfectamente coordinada antes de la entrega al cliente final.

Por lo tanto, la metodología a seguir para la puesta en marcha de los sistemas debía seguir estándares y

procedimientos internacionales como los utilizados en proyectos industriales de cualquier índole y otros diseñados específicamente para la instalación, como por ejemplo aquellos necesarios para las pruebas de estanqueidad de válvulas, compuertas y mamparos y el propio proceso de inundación de las esclusas, de los que hablaremos más adelante.

Para lograr desarrollar una adecuada estrategia de puesta en marcha es necesario disponer de un plan detallado, comenzando con el fin de las actividades de instalación de los distintos equipos electromecánicos, pasando por el precomisionado y la puesta en marcha de cada uno de los sistemas y posterior integración de los mismos. Para poder diseñar un plan de puesta en marcha eficiente es necesaria una planificación fiable y detallada desde la fase de construcción. Esta planificación debe tener en cuenta las necesidades de instalación y puesta en marcha desde tempranas fases del proyecto con la intención de facilitar el comienzo de la instalación de los equipos, el precomisionado y su integración, así como la minimización de interferencias entre disciplinas y al mismo tiempo tener en cuenta que ha de existir un alto grado de actividades contemporáneas de obra civil, instalación electromecánica y puesta en marcha para optimizar los tiempos totales de obra.

Con esta intención el equipo de puesta en marcha se integró en el proyecto en sus etapas iniciales. El desarrollo de este plan de puesta en marcha fue consensuado en todo momento con las distintas partes implicadas. Hay que tener en cuenta que muchos de los trabajos de puesta en marcha de los distintos equipos eran llevados a cabo por los fabricantes y suministradores de los mismos. Esto supone una ventaja en el sentido que el propio diseñador y fabricante del equipo toma responsabilidad en la puesta en marcha pero, por otra parte, multiplica las interferencias entre el contratista y los subcontratistas e incluso entre subcontratistas. Aquí es donde reside la clave del éxito de la puesta en marcha. GUPC tomó un papel de liderazgo claro, marcando el camino a seguir y buscando la participación de todas las partes implicadas potenciando el trabajo en equipo, teniendo en cuenta que, en muchas ocasiones, las prioridades de cada una de las partes no necesariamente coincidían en cada momento. Esto se consigue con mucho contacto entre las partes y con planificaciones claras en cuyo desarrollo participen todos los equipos involucrados.

Asimismo, fue necesario implantar un sistema de permisos de trabajo, así como el procedimiento LO-TO (“Lockout-tagout”) para desarrollar todas las pruebas de puesta en marcha en condiciones de seguridad.

La mayor parte de los trabajos civiles de construcción se realizaron en seco. La fecha de la inundación de las instalaciones una vez terminada la construcción civil era clave, no solamente para el equipo civil sino también para el de instalación y la puesta en marcha. Por ejemplo, las compuertas sólo se pueden mover con la instalación inundada, de ahí la importancia de llegar a esta fase con la mayor parte de los sistemas ya instalados y precomisionados.

Siguiendo una secuencia lógica, el contrato marcaba cuatro niveles de pruebas de aceptación en campo (Site Acceptance Tests (SATs)), desde el nivel 1 al 4, en función del grado de integración de los sistemas. SAT1 son las pruebas e inspecciones para asegurar una correcta instalación. SAT2 son los test a cada sistema individual, lo que podríamos asociar al precomisionado. SAT3 son pruebas de

integración de sistemas. SAT4 ya son los test realizados a todos los sistemas trabajando totalmente integrados a plena carga, es decir, la instalación trabajando en condiciones normales de operación.

De esta manera la puesta en marcha de los sistemas se organizó siguiendo el modelo de Turn Over Packages (TOP). El equipo de puesta en marcha aceptaba y tomaba control y responsabilidad sobre los equipos electromecánicos una vez estos estaban instalados y con las SAT1 terminadas. Comenzando con las pruebas de precomisionado de cada uno de los equipos individuales (SAT2) y teniendo en cuenta las secuencias de integración entre diferentes sistemas (SAT3 y 4), cada uno de estos tests fueron debidamente documentados y presenciados por la ACP y el resto de las partes interesadas.

Después de las pruebas SAT venían las pruebas de desempeño o performance de distintos sistemas individuales. Un ejemplo son las pruebas de performance de las compuertas que debían operar 20 ciclos completos de apertura y cierre consecutivos en un periodo de 12 horas sin presentar ninguna falla. Tras las pruebas de performance de los sistemas venían las pruebas de performance de la instalación como conjunto, en las que se demostraba que la instalación operaba dentro de los parámetros de diseño. Teniendo en cuenta lo anterior, la puesta en marcha del

proyecto se dividió en dos periodos principales claramente diferenciados: Pruebas en seco y pruebas en inundación.

Pruebas en Seco

Las pruebas en seco son fundamentalmente las pruebas de instalación y precomisionado de los equipos electromecánicos para las que no se necesitaba la instalación inundada, por lo que se podía comenzar en el mismo instante en que la instalación estaba terminada. Estas pruebas son las SAT1 y las SAT2 principalmente.

En esta categoría podemos incluir por ejemplo las pruebas a los sistemas eléctricos previas a la energización de los mismos, como inyecciones primarias y secundarias en las protecciones eléctricas, alineación de motores y ajustes mecánicos en los diferentes sistemas así como pruebas de señales en los sistemas de control, por mencionar solo algunas.

Durante esta fase se procedió también a realizar pruebas de estanqueidad en válvulas y mamparos. La creatividad y flexibilidad del equipo técnico de GUPC durante esta fase fue significativa pues debía demostrar que las válvulas y mamparos cumplían con los exigentes estándares de estanqueidad antes incluso de tener inundada la instalación con la intención de tomar medidas inmediatas en caso de que surgiese algún imprevisto. Las válvulas y mamparos no

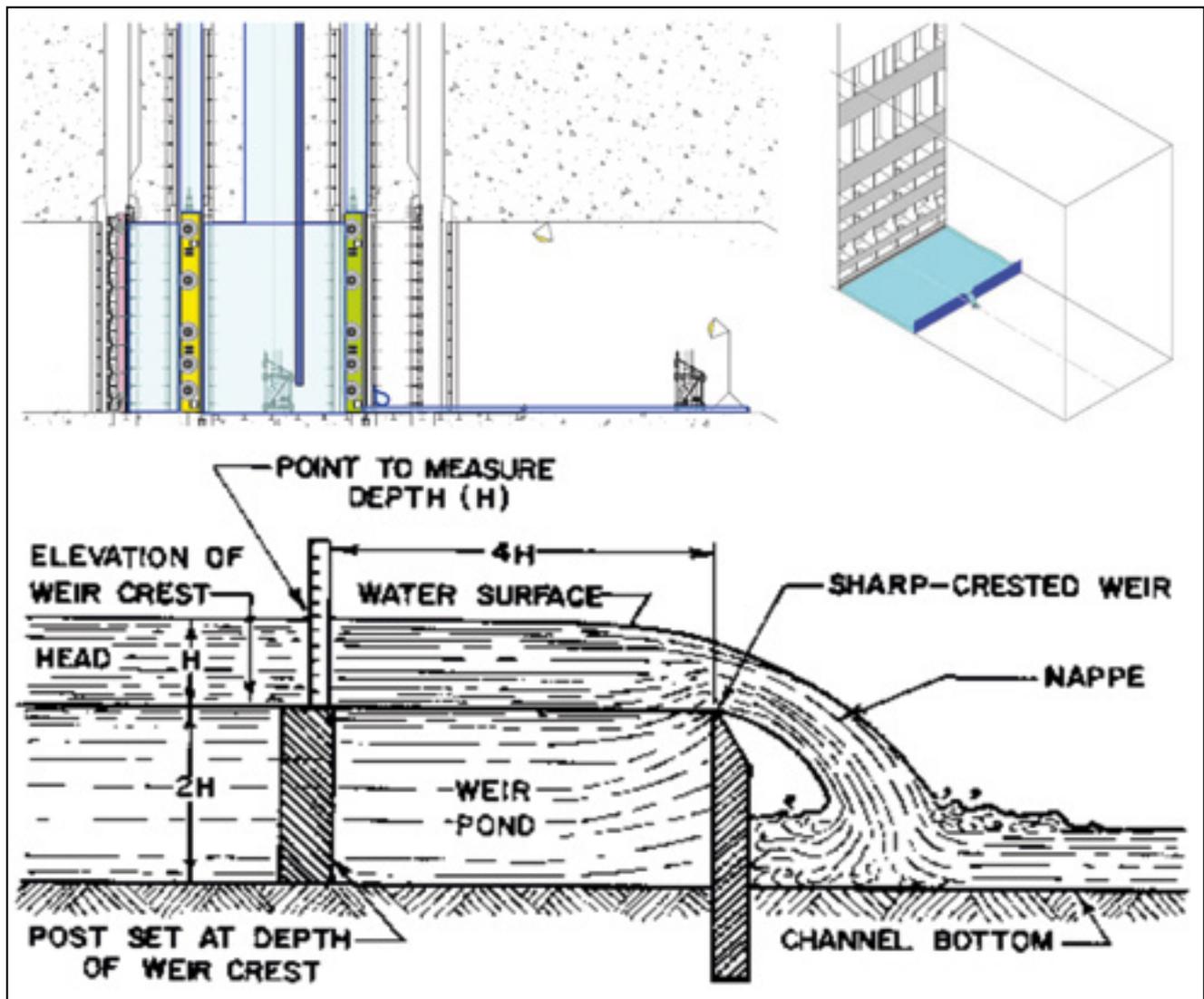


Figura 40. Medición de fugas en válvulas con V-Notch y vista del mamparo especial utilizado.



Figura 41. Vista de las esclusas del sector Pacífico antes de la inundación en Junio de 2015.

podían tener una fuga superior a 1.25 litros por metro por minuto.

Se tomó esta decisión de conocer con anterioridad a la inundación que los equipos funcionaban como se esperaba porque si surgía algún problema con la instalación inundada el margen de reacción sería mínimo y las dificultades para realizar reparaciones serían realmente significativas. Para ello se diseñaron y fabricaron mamparos especiales para poder llevar a cabo las pruebas. Instalando estos mamparos en localizaciones específicas se podía llenar el volumen entre los mismos y las válvulas a probar, alcanzando columnas de agua equivalentes a las de operación sin necesidad de inundar la instalación, con el consiguiente ahorro de tiempo y reducción del riesgo. Para medir la fuga se utilizó el método V-Notch que proporciona el caudal a través de una sección en V basándose en la profundidad de la lámina de agua. En la figura 40 se puede ver la configuración de una de las pruebas de estanqueidad de válvulas y la medición con V-Notch.

Como se mencionó anteriormente, las compuertas no se podían operar sin la instalación inundada. La única

opción para probar el sistema de tracción de las compuertas ya conectadas era después de la inundación, por lo que si surgía algún problema las dificultades para tomar acciones serían, una vez más, muy perjudiciales para el proyecto. Se decidió adelantar pruebas en el sistema de tracción de la compuerta instalando de forma temporal todos los sistemas de control y alimentación eléctrica a uno de los vagones superiores de las compuertas, para que de esta manera se pudiera probar, sin compuerta, el comportamiento del sistema antes de la inundación. Todas estas pruebas en seco dieron como resultado una amplia gama de lecciones aprendidas y acciones de mejora en los sistemas antes de inundar la instalación, que se tradujeron en grandes ahorros de tiempo durante las pruebas en fases finales.

Pruebas en inundación

El proceso de inundación en sí mismo merece atención especial por los retos que presentó. El primero de estos retos era la necesidad de suministrar un caudal de 40.000 m³/hora de forma constante para poder inundar la



Figura 42. Inundación del lado atlántico el 10 de Junio 2015.



Figura 43. Detalle de las motobombas en el lado Pacífico antes de la inundación.

instalación con la velocidad necesaria para que los sellos de las compuertas actuaran adecuadamente. Se emplearon dos métodos diferentes en distintas fases en función de disponibilidad de agua en el complejo en el que se realizase la inundación, Atlántico o Pacífico. El agua empleada siempre provenía del Lago Gatún.

El primero de los métodos consistía en instalar 5 tuberías de 36 pulgadas con válvulas para controlar el caudal, tal y como se muestra en la figura 42.

El segundo método, empleado en el lado Pacífico, consistió en la instalación por parte de ACP de 14 motobombas más 3 bombas eléctricas con un caudal conjunto aproximado de 40.000 m³/hora (ver figura 43).

Una vez garantizado el caudal, el siguiente paso era definir el proceso de inundación. Hay que tener en cuenta que antes de seguir inundando a niveles superiores hay que asegurarse que las compuertas y válvulas en las cámaras inferiores están completamente operativas y que cumplen con los criterios de diseño y operación, con especial atención a la estanqueidad de las compuertas. Es decir, primero se inundaba hasta niveles mínimos operativos en la cámara inferior. A este nivel se ponían en marcha las compuertas

5, 6, 7 y 8. Una vez que los resultados de las pruebas eran satisfactorios se procedía a cerrar dichas y se procedía a inundar a niveles mínimos operativos para la cámara media. Durante este proceso se intercalaban también las pruebas de estanqueidad de las compuertas para las cuales era necesario llenar una cámara hasta los niveles establecido y secar completamente la cámara inferior, tal y como se muestra en la figura 44.

Los criterios de fuga en compuertas eran extremadamente exigentes; no podía superar 5 litros por metro por minuto en promedio ni 10 litros por minuto de forma puntual. En todo el proceso de inundación se movieron aproximadamente 12 millones de metros cúbicos en Pacífico y cerca de 8 millones de metros cúbicos en Atlántico. Este proceso fue de 110 días desde comienzo de la inundación hasta tener todas las compuertas y válvulas operativas en condiciones de operación normal. La figura 45 representa un ejemplo de un momento determinado del proceso de inundación y el estado de válvulas y compuertas necesario para ese instante. Los planes se discutían diariamente con todos los implicados a primera hora de la mañana para coordinar todas las actividades.



Figura 44. Medición de fugas en compuertas.

Tras la etapa de inundación se entraba en la fase de pruebas de rendimiento y de simulación de maniobra (performance tests y trial operations). El objetivo de las pruebas de rendimiento era demostrar que el Canal operaba dentro de los parámetros de diseño. Los principales parámetros a verificar fueron:

1. La velocidad del flujo no podía superar 8m/s en ningún punto en contacto con el hormigón.
2. Las pendientes de nivel de agua en las cámaras no podían superar longitudinalmente 0.14 por mil y transversalmente 0.1 por mil.
3. Velocidades superficiales en zonas de captación y descarga no podían superar 1.25m/s
4. Tiempo de llenado de una cámara no podía superar 10 minutos sin utilizar las tinajas de ahorro de agua y 17 minutos con la utilización de las tinajas.
5. La instalación no debía presentar cavitación ni golpes de ariete.
6. El ahorro de agua con el uso de las tinajas de recuperación de agua debía ser del 60%.

Fue necesario instalar instrumentación de alta precisión para medir caudales, velocidades de flujo y niveles de agua en las cámaras durante estas pruebas. Para recoger toda la información se instaló una red de comunicaciones y un sistema de adquisición y análisis de datos dedicado, independiente del sistema de control del Canal. Este sistema también

recogía las posiciones de las válvulas en cada operación para poder analizar los datos de forma sincronizada.

El sistema de instrumentación para registrar estas pruebas es altamente tecnológico y diseñado específicamente para esta aplicación. Para la medida de caudal y velocidad de flujo se instalaron caudalímetros ultrasónicos de 8 vías.

La medida de nivel de agua en las cámaras era otro parámetro altamente exigente. Durante los llenados y vaciados las diferencias de nivel en ambos extremos de la cámara longitudinalmente y transversalmente no podían superar 51mm en una distancia de 366m, longitudinalmente a la cámara y 5.5mm en 55 metros, transversal a la cámara, para evitar someter los buques a esfuerzos excesivos. Para realizar esta medición se usaron 6 transmisores de nivel tipo radar con la precisión adecuada distribuidos estratégicamente en la cámara.

Para la medida de velocidades superficiales se emplearon ADCPs (Acoustic Doppler Current Profiler). Este dispositivo se instala en el fondo marino y emite pulsos de forma constante para medir velocidades en una franja de 5 metros de la superficie.

Otros parámetros importantes a verificar eran la no existencia de atrapamiento de aire y la no existencia de golpe de ariete para los que se instalaron decenas de sensores de presión para realizar medidas continuas en válvulas y mamparos.

Una vez las pruebas de rendimiento resultaron satisfactorias se procedió a los trial operation. Estas pruebas

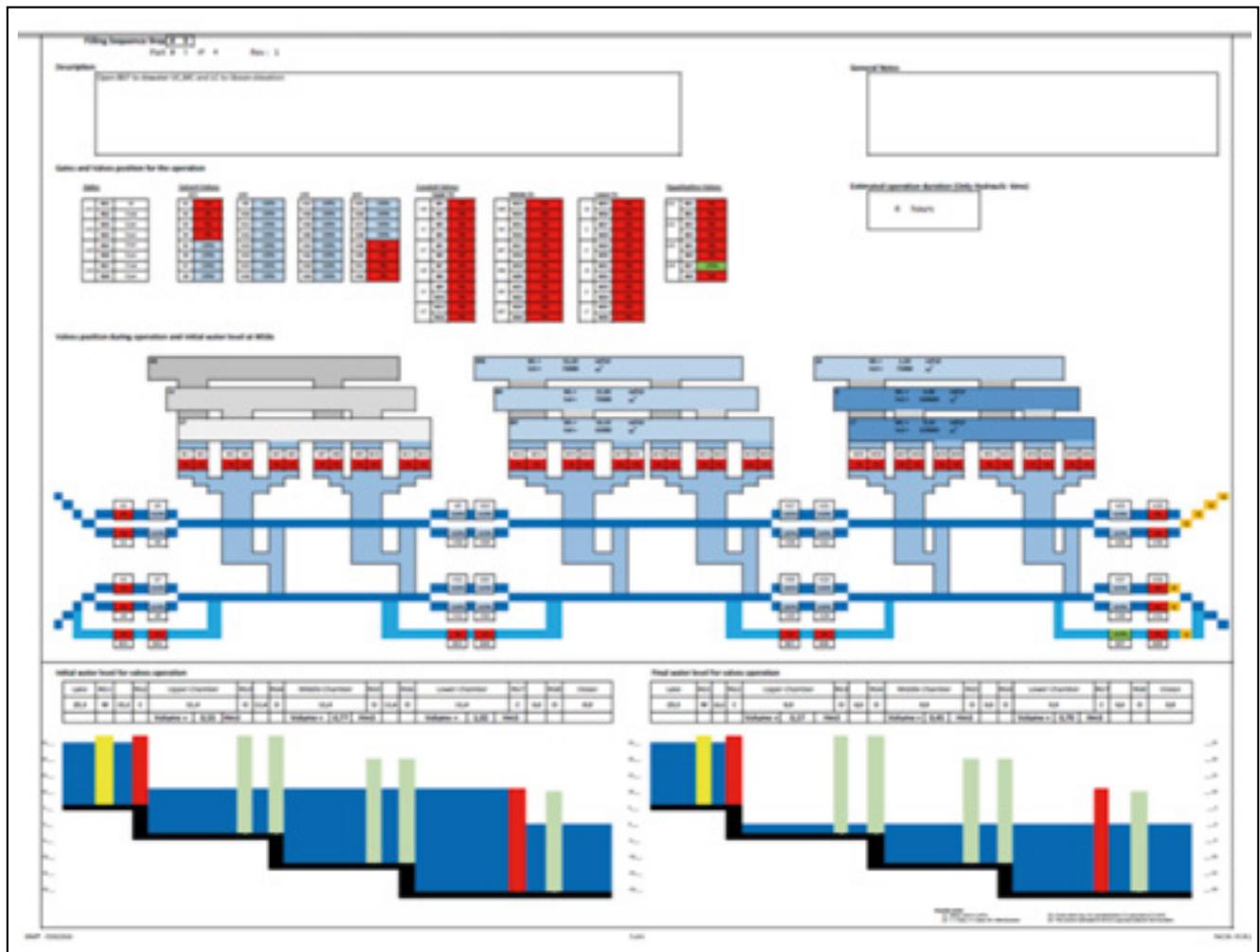


Figura 45. Ejemplo ilustrativos de uno de los pasos de la inundación.



Figura 46. Transmisores de nivel para medir nivel en cámaras.

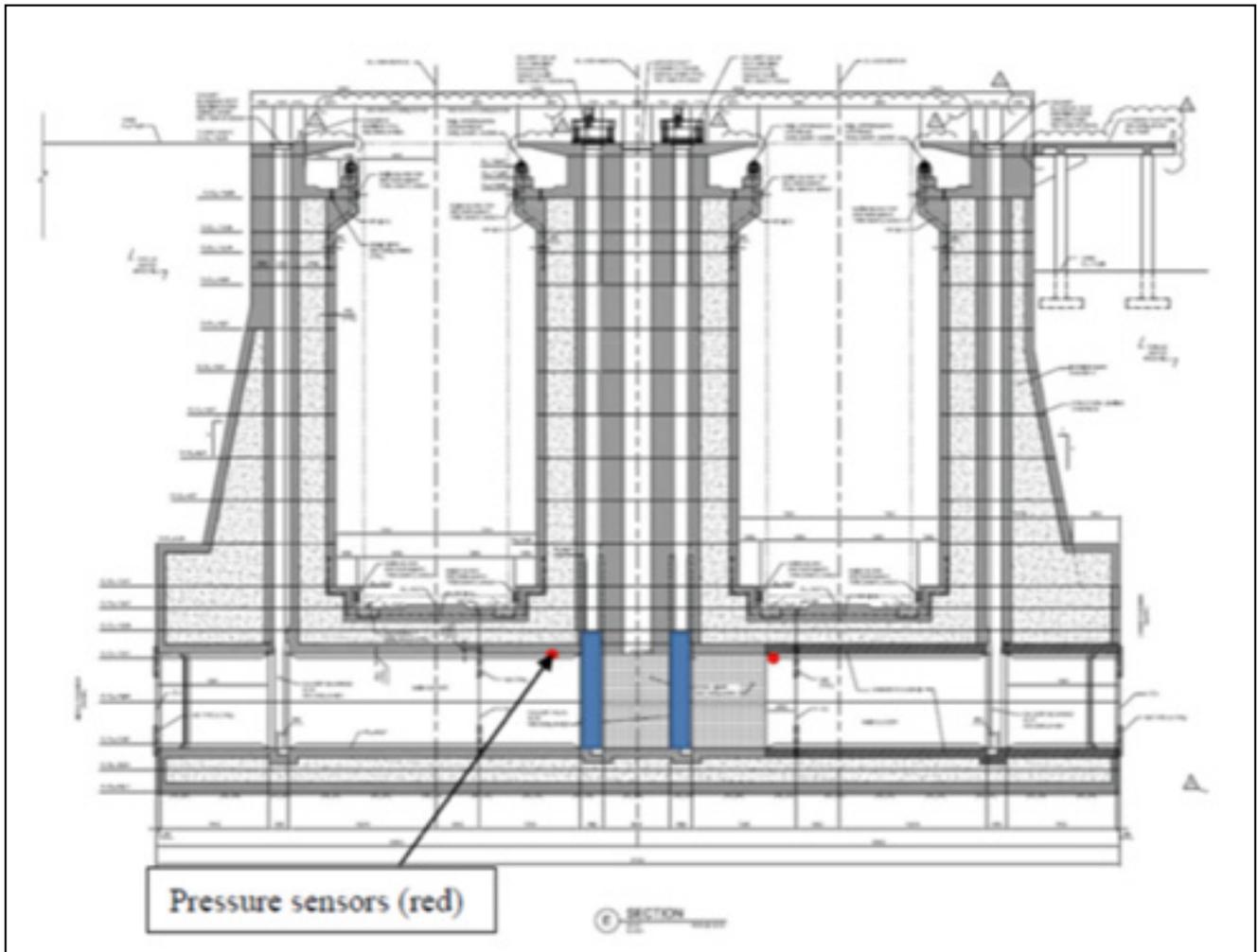


Figura 47. Ubicación de sensores de presión durante la puesta en marcha.



Figura 48. Pruebas con buque Baroque (granelero neopanamax de 255 m de eslora y 45 m de manga).

consistían en la realización de esclusajes en operación normal con todos los sistemas integrados, simulando turnos de operación aunque sin buque. El propósito de estas pruebas era comprobar que la instalación cumplía con todos los requisitos y se podía proceder al siguiente paso y realizar pruebas con buque. En estas pruebas se comprobaban los tiempos de esclusaje, otro de los parámetros críticos a tener en cuenta. Estos tests consistían en realizar 8 esclusajes consecutivos con la utilización de tinas de ahorro de agua, 4 de Norte a Sur, una operación de turn around (preparación de esclusas para el cambio de sentido) y otros cuatro esclusajes de Sur a Norte. Del mismo modo había que realizar 4 esclusajes consecutivos sin la utilización de tinas de ahorro de agua. Dos esclusajes de Norte a Sur, operación de turn around y dos esclusajes de Sur a Norte. Una vez todas estas pruebas resultaron satisfactorias, el canal ya estaba listo para recibir buques. Así sucedió en el sector Atlántico con el buque Baroque en Junio de 2016, momento cumbre del proceso de puesta en marcha.

Su primer tránsito se realizó el 9 de junio y desde entonces hasta la inauguración se siguió usando en los ensayos preliminares.

En Pacífico, estas últimas simulaciones se hicieron habitualmente sin buque, salvo en dos ocasiones, el 20 de junio y el 23 de junio. La primera embarcación utilizada fue una grúa flotante de nombre Oceanus, y la segunda, un contenedor cargado que estaba haciendo el tránsito del canal desde el Atlántico y que se desvió hacia el nuevo juego de esclusas del Pacífico. Se trataba de la embarcación Cosco Houston, un panamax de 261 m de eslora y 32,3 m de manga, el tamaño máximo posible en las esclusas originales del canal.

Desde finales de abril de 2016, se realizaron 208 esclusajes para las distintas pruebas de puesta en marcha. El volumen total de agua desembalsada ascendió a unos 33 millones de metros cúbicos.

Los resultados de las pruebas realizadas en los últimos 5 meses y medio de obra dieron como resultado una mejora de los requerimientos del contrato firmado entre la ACP y GUPC, en el sentido de que se había logrado optimizar procesos, reduciendo los tiempos de esclusaje.

El éxito de la puesta en servicio del Tercer Juego de Esclusas ha radicado, por tanto, en una serie de factores que han sido determinantes y que podrían sintetizarse en cuatro ideas clave: anticipación, priorización, seguridad y coordinación de los equipos de trabajo.

8. CONCLUSIONES

La ampliación del canal ha sido catalogada en varias publicaciones como la obra más importante de los últimos años a nivel mundial. No hay duda que la importancia estratégica del Canal de Panamá y su épica construcción original, con todas las dificultades que sufrieron Ferdinand de Lesseps en primera instancia y el gobierno americano en su etapa final, han influido en esta consideración. No obstante, existen otros elementos que han contribuido al interés mediático suscitado en todo el planeta durante su construcción. Entre dichos elementos técnicos destacan los enormes volúmenes de obra, las dimensiones de las compuertas, las piscinas de ahorro de agua y la singularidad del proyecto en sí mismo.

8.1. Los volúmenes de obra

En los capítulos anteriores se han detallado las magnitudes que hacen del nuevo Canal una megaobra. Estos volúmenes requieren una logística especial tanto de aprovisionamiento como de ejecución de obra. El escaso tejido industrial presente en Panamá complica mucho más dicha logística. Ha sido necesaria, por tanto, una planificación detallada para resolver este punto.

8.2. Las dimensiones de las compuertas

Las 16 compuertas de acero han centrado el interés técnico de la obra durante su fase final. El transporte de estas 16 estructuras ha resultado complejo, no solo por su peso (casi 4.000 ton en el caso más desfavorable) sino también por su tamaño (58 m de longitud, 10 m de anchura y 33 m de altura). Los equipos y experiencia en procesos de transporte e instalación de carga pesada se han llevado a su máxima capacidad.

8.3. Piscinas de ahorro de agua

El motor principal del canal como ya hemos mencionado es el agua proveniente de la lluvia. Uno de los requisitos del proyecto era conseguir ahorrar el agua que se utiliza en la operación del Canal. Las piscinas laterales de ahorro de agua han resultado una medida innovadora que ha funcionado perfectamente y ha conseguido reutilizar en promedio un 60% del agua utilizada en cada esclusaje.

8.4. La singularidad del proyecto

Las nuevas esclusas han sido sin duda un proyecto singular que ha requerido el desarrollo de soluciones inéditas; prototipos nunca utilizados anteriormente. Es aquí donde la innovación ha jugado un papel clave en el éxito técnico del proyecto. Entre las innovaciones de los elementos electromecánicos más significativas hemos de destacar las relativas a los materiales y procedimientos constructivos y también las que hacen referencia directa a la ejecución. En la dosificación del hormigón también ha sido necesario implementar medidas innovadoras que han sido ya objeto de artículos técnicos al respecto.

Innovaciones en materiales y procedimientos constructivos:

Las esclusas, así como otras obras hidráulicas, combinan dos tecnologías que se construyen de forma diferente: la parte de obra civil con puesta en obra de hormigón con precisiones centimétricas y la mecánica que requiere precisiones milimétricas. En la instalación de las válvulas (raíles de guiado) y de las compuertas (elementos de guiado, soporte y sellado) ha sido necesario resolver complejos problemas para compatibilizar la obra civil y los elementos mecánicos. La solución final ha pasado por la instalación de elementos de ajuste (embebidos de primera y segunda etapa de hormigonado) y la selección de materiales como el polietileno de alta densidad que posibilitaban la mecanización en taller o in situ para lograr precisiones del orden de magnitud de 1 mm.

En paralelo, las especificaciones del pliego de referencia de la ACP incluían el cumplimiento de unos valores de fuga de agua a través de los sellos de las compuertas muy exigentes e inusuales en este tipo de infraestructura. Las soluciones conocidas para ese punto de contacto utilizando acero inoxidable, piedra pulida, maderas especiales u otros materiales usados en las esclusas parecidas en Holanda o Bélgica no resultaban adecuadas. Es por ello que GUPC junto con sus diseñadores y subcontratistas inició una investigación

para desarrollar una solución que combinaba un sello de caucho armado con láminas de acero sobre unos paneles pretensados de polietileno de alta densidad. Tras varios ensayos en las instalaciones de CIMOLAI, la Universidad de Udine (Italia), las instalaciones de ensayo en modelo físico 1:1 de MARIN (Holanda), ensayos de fatiga en varios laboratorios europeos y pruebas de ajuste en obra, se consiguió el resultado esperado, cumpliendo los requisitos del cliente.

La funcionalidad de los sistemas auxiliares descritos anteriormente también ha requerido el uso de los equipos más innovadores del mercado, haciendo a veces necesaria una adaptación a medida para la aplicación en el Canal de Panamá.

Innovaciones en ejecución:

Es difícil segregar aquellos aspectos que han destacado por su innovación en el proceso constructivo. Los puntos mencionados anteriormente: volúmenes de obra, transporte e instalación de compuertas, han generado en sí mismos la necesidad de implantar secuencias y procedimientos poco habituales en obra. Hay, sin embargo, una característica de esta obra que la hace singular en frente a muchas otras: combina una obra civil de grandes volúmenes con elementos propios de una obra industrial también de gran magnitud y de elevada complejidad. Por ejemplo, en la fase de puesta en marcha se han llevado a cabo más de 200 esclusajes de calibración que requirieron más de 33 millones de m³ de agua, más de 2.000 pruebas de integración de los diferentes sistemas presentes y se debieron cumplir bajo la supervisión de ACP las 14 pruebas con 36 escenarios hidráulicos distintos para verificar los requisitos del proyecto. Estas actividades se llevaron a cabo mientras se completaban el resto de actividades civiles, mecánicas, eléctricas y de control. Esta simultaneidad de actividades solo se consigue gestionar mediante la adecuada preparación (planificación) como con un sistema de control práctico y efectivo.

El primer punto relativo a la ejecución de la fase de puesta en marcha se pudo superar con una planificación minuciosa y de mucho detalle. Dicho proceso se preparó durante más de un año y medio. Las miles de actividades previstas se analizaron para finalmente elaborar una secuencia que permitía ajustes en función del grado de avance de la obra y los imprevistos que podían aparecer. Con el procedimiento ya desarrollado, la secuencia de puesta en marcha se pudo completar en 7 meses, reduciendo en casi 2 meses el tiempo inicialmente previsto.

El segundo punto era el relativo al sistema de control que permitiera el solape de los cientos de actividades simultáneas y concurrentes en el mismo espacio que se daban a diario. Se requería una metodología sencilla que asegurara la posibilidad de avanzar en todos esos frentes pero reduciendo al mínimo posible la posibilidad de accidentes. Si existe simultaneidad de trabajos eléctricos, pruebas de equipos móviles y actividades civiles (pintura, hormigonados, acabados en edificios) por exigencia del programa, el riesgo de accidente aumentaba significativamente. La solución fue la implantación de un sistema de permisos de trabajo por zonas, controlados mediante procedimiento LO-TO ("Lockout-tagout") y supervisado por un equipo de especialistas ("dispatchers"). Este sistema, aunque habitual en obras en plantas industriales, ha sido novedoso en



Figura 49. Paso del buque Cosco Shipping Panama con 10.000 TEUs durante la inauguración del pasado 26 de Junio de 2016.

una obra de miles de personas con simultaneidad de actividades de tantas disciplinas distintas.

8.5. Reflexión final

Como conclusión final destacar que la capacidad de innovar de los técnicos que han participado en esta obra ha sido una de las claves para poder superar el reto al que se comprometió SACYR frente a Panamá y el resto del mundo.

El know-how adquirido debe permitir afrontar obras de envergadura y de elevada complejidad técnica en las que las empresas españolas están en vanguardia internacional.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad del Canal de Panamá (ACP) (2010 – 2016). *Informes*. Berrocal Menárguez, A.B. (2016). *El Nuevo Canal de Panamá*. Barcelona: Lectura Plus.
- Grupo Unidos por el Canal (GUPC) (2010 – 2016). *Informes técnicos*.
- McCullough, D. (1977). *The Path Between the Seas: The Creation of the Panama Canal, 1870-1914*. Nueva York (EE UU): Simon & Schuster.
- Parker, M. (2007). *The Panama Fever: The Battle to Build the Canal*. Londres (RU): Hutchinson.

Puertos y navegación

Líneas de actividad

Diseño portuario

Explotación portuaria

Seguridad marítima

Estructuras y materiales

Medio ambiente

.....

Fields of Activity

Maritime Port Engineering

Port Managing

Maritime Safety

Structures and Materials

Environment



Más información en
<http://www.cedex.es>

CEDEX

Centro de Estudios y Experimentación
de Obras Públicas