

Diseño de un Sistema de Extracción de Gas en el Lago Kivu (Ruanda)

Design of a Gas Extraction System in Lake Kivu (Ruanda)

Manuel Alejandro Nicolás Pazo^a, María Calero Monteagudo^b, Miriam Morchón Miranda^c, Javier Rueda Gallego^d, José Manuel García Muiña^e, Roberto Pillado González^f

^a Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. PROES Consultores. Director de Proyectos. manuel.nicolas@proes.es

^b Máster Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. PROES Consultores. Jefa de Proyectos. maria.calero@proes.es

^c Máster Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. PROES Consultores. Jefa de Proyectos. miriam.morchon@proes.es

^d Ingeniero Civil. PROES Consultores. Jefe de Proyectos. javier.rueda@proes.es

^e Máster Ing. de Caminos, Canales y Puertos. PROES Consultores. Director de Desarrollo de Negocio. jmanuel.garcia@proes.es

^f Máster Ing. de Caminos, Canales y Puertos. PROES Consultores. Director de Infraestructuras Marítimas. roberto.pillado@proes.es

RESUMEN

El proyecto de extracción de gas en el lago Kivu, situado en el Rift de África Oriental, tiene como objetivo aprovechar 60 km³ de metano disuelto en sus aguas profundas. PROES Consultores diseñó una innovadora plataforma flotante de extracción, en una zona de 500 m de profundidad, que incluye conducciones de extracción y reinyección, sistema de amarre de la plataforma y la tubería de exportación flotante de 32 km de longitud. El diseño se realiza en el dominio del tiempo, con hipótesis de grandes desplazamientos, siendo remarcable el diseño a fatiga por medio del método de *rainflow*.

ABSTRACT

The gas extraction project in Lake Kivu, located in the East African Rift, aims to harness 60 km³ of methane dissolved in its deep waters. PROES Consultores designed an innovative floating extraction platform in a 500-meter-deep area, which includes extraction and reinjection pipelines, a platform mooring system, and a 32-kilometer-long floating export pipeline. The design is carried out in the time domain with large displacement assumptions, with notable emphasis on fatigue design using the *rainflow* method.

PALABRAS CLAVE: dominio del tiempo, fatiga, *rainflow*, oleaje, grandes desplazamientos.

KEYWORDS: time domain, fatigue, *rainflow*, wave, large displacements.

1. Introducción

El Lago Kivu, ubicado en el Rift de África Oriental, forma parte de la frontera entre Ruanda y la República Democrática del Congo en el continente africano. Tiene unos 90 km de largo y 50 km en su punto más ancho. En la zona central del lago, se alcanzan los 500 m de profundidad (Figura 1).

Las aguas del lago Kivu presentan una estructura estratificada en escalones (Figura 2), de manera que no se produce una mezcla de aguas entre los diversos estratos. Se estima que en las aguas profundas del Lago Kivu quedan confinadas aproximadamente 60 km³ de metano y 300 km³ (TPE) de dióxido de carbono disuelto.

La mayor parte del metano se almacena en la parte más profunda del lago, conocida como la "Zona de Recursos". Este gas disuelto, y por ende el metano, puede ser extraído del agua del lago utilizando una instalación de procesamiento offshore montada en una barcaza. El gas metano proporcionará una gran fuente de energía para la región de Kivu.



Figura 1. Localización del lago Kivu.

Optimus Services Limited (OSL) fue contratada por la concesionaria Gasmeth Energy Limited, en colaboración con PetroVision, para llevar a cabo el desarrollo del proyecto constructivo de una de las plataformas de Extracción de Gas metano del Lago Kivu, siendo PROES consultores la empresa responsable de la realización de todo el diseño estructural del proyecto.

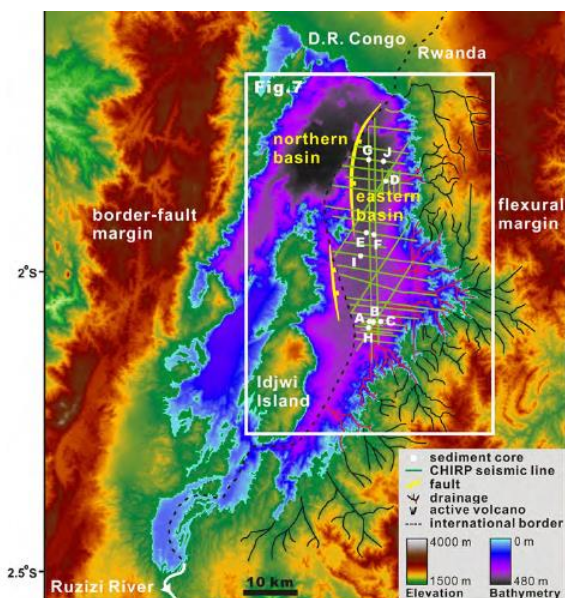


Figura 2. Batimetría del lago Kivu.

El proceso comprende el sifonamiento del agua del lago a través de los risers, la separación de gas y agua en la plataforma, el procesamiento y acondicionamiento del gas, la reinyección del agua desgasificada en una zona apropiada para mantener la estratificación existente del lago y la exportación del gas para su uso en tierra. El alcance del proyecto estructural desarrollado por PROES Consultores incluye el diseño de los risers de extracción y reinyección, la pontona de soporte, el sistema de posicionamiento de la pontona, las plataformas superiores, la tubería de exportación de gas y las estaciones de medición de gas necesarias. La capacidad de diseño será producir 10 MMSCFD (millones de pies cúbicos estándar por día) de gas CH₄ a lo largo de los 25 años de vida útil.

2. Diseño de la plataforma de extracción

2.1 Pontona principal

La pontona estará ubicada en una zona del lago Kivu con 465 metros de profundidad. El diseño de la pontona se encuentra limitado por el deficiente acceso al lago desde un astillero capaz de construirla. Por este motivo se decidió ejecutar la pontona utilizando varios elementos prefabricados que serán transportados individualmente desde uno de los principales puertos costeros de África a Kivu y ensamblados en el puerto auxiliar ejecutado sobre los bordes del lago. Las limitaciones del transporte terrestre de los módulos imponen unas dimensiones máximas de los mismos de 12,2 x 2,44 x 3,47 m. La unión entre los módulos se realiza con tornillos. La forma y tamaño general de la pontona están determinados por la disposición de los equipos de la cubierta superior y las necesidades de estabilidad naval. El número total de módulos es 153, con unas dimensiones globales de 85 x 65 m (Figura 3).



Figura 3. Vista de la pontona.

El diseño de la pontona se complementa con un sistema de cuatro risers de 465 m de longitud, para la extracción de agua enriquecida en CH_4 . Estos elementos están compuestos por una camisa de acero inoxidable, a lo largo de los primeros 200 m de longitud, que aloja una tubería interior de HDPE. Las bombas de impulsión se encuentran en el extremo del encamisado de acero, a 200 m de profundidad. Además, se instalan cuatro tuberías de reinyección de 290 m, tres tuberías de extracción de agua de proceso de 20 m y una tubería de reinyección de agua de proceso de 60 m, todas ellas de acero inoxidable, debido a las características corrosivas del agua del lago, que contiene altas concentraciones de CO_2 y de H_2S .

2.2 Sistema de amarre

El sistema de posicionamiento de la pontona se compone de ocho líneas simétricamente dispuestas, que la anclan al lecho marino. Este sistema se diseña para mantener la posición y orientación de la pontona estable frente a las cargas de viento y oleaje del lago, así como para las cargas debidas a los procesos industriales que se desarrollan sobre ella.

Debido a la gran profundidad del emplazamiento, el sistema de amarre elegido se corresponde con un sistema semitenso, compuesto por un tramo inicial de cadena de acero de 50 m de longitud, con eslabones sin contrete de 66 mm, un tramo intermedio de cuerda de HMPE de 600 m de longitud y 56 mm de diámetro y un tramo final de cable de acero

de 50 m y 40 mm de diámetro. La densidad del tramo sintético es 1,6 kg/m, por lo que la línea flota. Cada uno de estos sistemas semirígidos se encuentra unido a una boya de superficie intermedia, conectada a la pontona por un último tramo de cable de acero de 50 m de longitud. Cada boya intermedia posee un diámetro de 5,80 m y una altura de 5,40 m, con una flotabilidad neta de 11.800 kg. La elección de este sistema combinado de amarre de la pontona permite su correcto posicionamiento y evita la transferencia de reacciones con componente vertical sobre la pontona. De este modo la flotabilidad de la pontona no se ve afectada por el sistema de amarre (Figura 4).

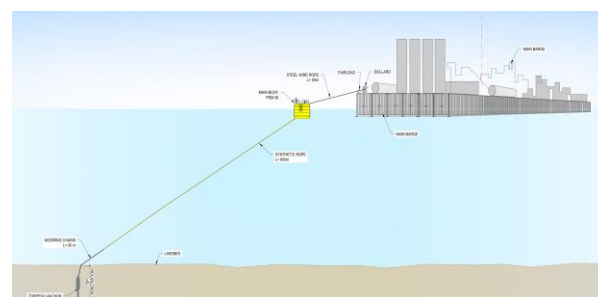


Figura 4. Sistema de amarre de la pontona.

El anclaje de las líneas del sistema de amarre se realiza por medio de pilotes de hincada dinámica por caída libre o torpedos. Estos torpedos quedan configurados por medio de tubos de acero de 17 m de longitud y 1,0 m de diámetro. La punta de los pilotes se dota de un acabado cónico que mejore la penetración en el estrato de cemento, mientras que la cola se completa con cuatro aletas dorsales para facilitar su orientación durante la caída. El pilote se rellena de acero de desecho para incrementar su peso, quedando esta chatarra fijada por medio de un mortero.

Para el despliegue de cada torpedo se recurre a un barco auxiliar de instalación que suspende el torpedo hasta la altura de lanzamiento. La altura de caída libre del pilote dinámico es calculada de manera que se alcance la velocidad crítica de caída, aumentándose al máximo la penetración del mismo en el sustrato sedimentario.

2.3 Modelo de cálculo del sistema de amarre

El diseño del sistema de amarre o SKS se realizó conforme a la normativa Det Norske Veritas (DNV), estableciéndose el diseño por medio de los Estados Límite.

Los modelos de cálculo empleados en el diseño del SKS se componen de simulaciones en el dominio del tiempo compuestas por un equilibrio estático inicial, un precálculo de inicio dinámico de 10 minutos de simulación y una simulación por estado de mar de 3 horas. Las simulaciones consideran hipótesis de grandes desplazamientos.

El modelo de cálculo para las líneas de amarre se corresponde con un modelo de masas amortiguadas (lumped mass model). La pontona se representó por medio de un modelo de difracción, mientras que las boyas intermedias se modelaron mediante masas puntuales con seis grados de libertad, sobre las que se consideran aplicados los efectos de presión hidrostática y arrastre, según la teoría de Morison.

Cada simulación se corresponde con un estado particular de mar, en el que se aplican oleajes irregulares definidos según espectros de Jonswap. La velocidad de la corriente se considera constante en cada simulación, para una distribución potencial de velocidades en la altura, con potencia 7. El viento se considera turbulento, conforme al espectro NPD.

El diseño de este complejo sistema de amarre mostró que, pese a la presencia de vientos de pequeña magnitud y que la superficie expuesta a la acción de éstos era escasa, se originaban fenómenos de relajación de las líneas entre boyas y pontona, que producían efectos de pico de gran relevancia.

3. Tubería de exportación del gas

La exportación del gas metano desde la pontona de extracción y procesado hasta la terminal de tierra se realiza por medio de una tubería única

de 508 mm de diámetro exterior y de Schedule 30. La tubería se proyecta con una calidad de acero offshore X46.

3.1 Trazado en planta de la tubería

El trazado de la tubería en planta se compone de tres segmentos. El primer tramo, desde la costa, es recto, con una longitud total de 28,4 km, seguido de un tramo curvo de radio constante de 1.750 m y 2,0 km de longitud, y un último tramo de acuerdo recto con 2,0 km de longitud. La longitud total de la tubería de expansión es 32,4 km (Figura 5).

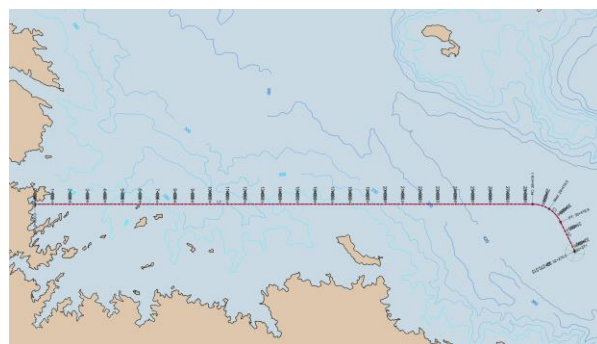


Figura 5. Planta de la tubería de exportación de gas.

El mantenimiento de este trazado en planta se garantiza por medio de un sistema de amarre tenso, compuesto por un lastre de fondo de hormigón, conectado a la tubería por medio de un tramo de cable sintético. El cable sintético permanece continuamente en tensión, por medio de una boya sumergida unida a la tubería en el punto de conexión. El ajuste de la tensión de la línea de amarre se regula mediante un tensionador de línea o ILT. El ajuste final de la tensión se realiza por medio de una segunda boya, ésta de superficie, conectada a la tubería mediante un cable de acero.

3.2 Alzado de la tubería

Debido a la gran profundidad del lago y a la presencia de una capa sedimentaria de escasas capacidades, se descartó en las fases iniciales la distribución de esta tubería de exportación sobre el fondo del lago. Por este motivo, el alzado de

la tubería es horizontal en la mayor parte del recorrido, situándose a 20 m de profundidad bajo la superficie del lago, salvo en sus dos extremos. En las zonas de desembarco en la costa, en las que el fondo del lago presenta una profundidad inferior a los 20 m, la tubería se instala sobre una trinchera practicada sobre el terreno existente, mientras que en el extremo de conexión con la pontona se realiza un acuerdo por medio de una lazy wave invertida, permitiendo el movimiento relativo entre la tubería y la pontona.

Dado que el peso del conjunto tubería y gas contenido es inferior a la flotación de la tubería, se la dota de lastres anulares de hormigón embridados, garantizando el hundimiento en situación de servicio. Estos lastres se combinan con un sistema de boyas de superficie, unidas a la tubería por medio de cadenas de acero, permitiéndose la estabilidad del conjunto en el caso del hidrotest o una inundación accidental. Este sistema de suspensión primaria se distribuye cada 40 m.

3.3 Modelo de cálculo de la tubería de exportación

El cálculo de la tubería de exportación se realizó de manera similar a las simulaciones del sistema de amarre de la pontona. La única diferencia es que, en este caso, el viento se considera uniforme, debido a su escaso efecto sobre el conjunto compuesto por elementos sumergidos.

3.4 Cálculo a fatiga

Aunque durante las fases iniciales no se realizó un cálculo a fatiga de los elementos estructurales del proyecto, debido a las benignas condiciones del emplazamiento, con oleajes de bajo periodo sin grandes energías, fue a lo largo del desarrollo del proyecto cuando se decidió realizar la comprobación de este Estado Límite. Las comprobaciones frente a fatiga se realizaron conforme a la normativa de proyecto que se

corresponde con la DNV. Conviene reseñar que el coeficiente de seguridad exigido por esta normativa para un elemento offshore, con difícil accesibilidad, es cuatro veces superior al impuesto por la norma UNE-EN 1993.

Conforme al estudio meteoceánico del emplazamiento, se definieron diferentes estados del mar con su probabilidad de ocurrencia. El número de estados de mar normales simulado es ligeramente superior al millar.

El método seguido para la comprobación de la fatiga en cada simulación fue el de la gota de agua de lluvia o rainflow, por medio del cual se determinan rangos de tensiones equivalentes, que permiten evaluar el daño acumulado a lo largo de cada simulación. A través de este método se determinó el daño acumulado en cada una de las simulaciones del estado del mar, de tres horas de duración. Finalmente, combinando estos daños en simulación con la probabilidad de ocurrencia de cada estado a lo largo de los 25 años de vida útil de la obra, se obtiene el daño acumulado para cada punto crítico de la tubería. Los resultados del estudio mostraron que las soldaduras entre virolas de tubería no ofrecían un nivel de seguridad suficiente.

Llegados a este punto, se realizó un estudio paramétrico de fatiga para determinar el principal origen del daño acumulado y la interacción entre el sistema de suspensión y la fatiga, concluyéndose que el origen de la fatiga radicaba en las olas de menor tamaño, que habían sido despreciadas en las fases iniciales del proyecto. Este oleaje de escasa energía y con alturas de ola entre 15 y 30 cm, pero muy frecuentes a lo largo de la vida útil, producían una vibración sobre las boyas de superficie del sistema que se traducían en movimientos impuestos a la tubería. Las primeras soluciones planteadas para reducir el impacto de estas vibraciones sobre la durabilidad de la obra fueron el incremento del espesor de pared de la tubería, reduciendo así la tensión sobre el material o el incremento de la separación entre boyas de suspensión, para limitar los efectos de

esta deformación impuesta sobre el elemento estructural.

Finalmente se encontró otra alternativa mucho más económica a este problema. Las estructuras cilíndricas sometidas a un flujo de velocidad constante pueden verse afectadas por las vibraciones debidas a los desprendimientos de vórtices de Karman, cuando la frecuencia de los vórtices y la estructura son similares. Para reducir estas vibraciones es habitual introducir espóilers helicoidales que modifican el flujo a lo largo de la tubería, frenando la producción de estos vórtices de Karman (Figura 6).

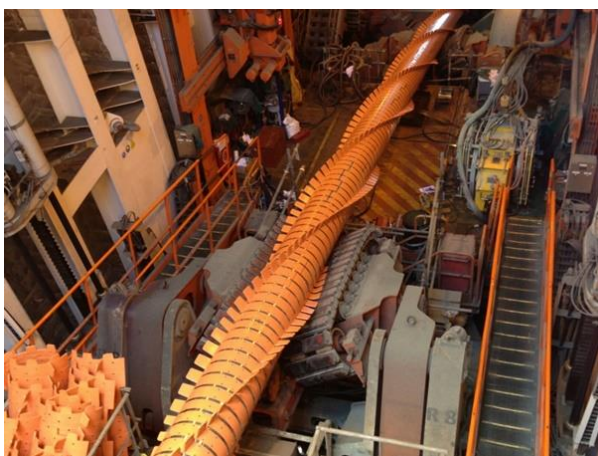


Figura 6. Spoilers disipadores de remolinos.

Sin embargo, uno de los efectos secundarios de estos espóilers es que incrementan de forma sensible el coeficiente de arrastre de la tubería en el fluido. Este efecto secundario, considerado como perjudicial, en nuestro caso supone un incremento de la resistencia del conjunto a la vibración del oleaje, lo que supone un incremento de la amortiguación total y una sensible reducción del daño por fatiga.

4. Puerto auxiliar

El puerto auxiliar se compone de una estructura rectangular de hormigón armado, compuesta por una losa maciza de 0,30 m de espesor sobre un entramado ortogonal de vigas rectangulares, con 1,0 m de canto total y 1,0 m de ancho. La luz entre apoyos de las vigas es 6,0 m. Los apoyos se

materializan mediante pilotes de hormigón de 0,80 m de diámetro. Estos pilotes se ejecutan por medio de un encamisado metálico recuperable de 10 mm de espesor.

Agradecimientos

Como finalización de este artículo nos gustaría agradecer al equipo técnico de OSL el apoyo y la cooperación aportada a lo largo del desarrollo de este proyecto constructivo, así como al contratista Galil, que ha sido capaz de aportar un tercer punto de vista a los detalles técnicos, permitiendo la materialización del esfuerzo de todo el equipo de diseño.