

# **Puente Centenario (Panamá): Limpieza e inspección robotizada con IA de los tirantes, y medición no intrusiva de sus fuerzas**

**Andrés Colmenares<sup>a</sup>, Abraham Hidalgo<sup>b</sup>, Miguel Ángel Calvo<sup>c</sup> y David Martínez<sup>d</sup>**

<sup>a</sup> Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Project Manager [andres.colmenares@vsl.com](mailto:andres.colmenares@vsl.com)

<sup>b</sup> Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Project Manager. [abraham.hidalgo@vsl.com](mailto:abraham.hidalgo@vsl.com)

<sup>c</sup> Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Director Producción Obra Civil. [miguelangel.calvo@vsl.com](mailto:miguelangel.calvo@vsl.com)

<sup>d</sup> Ingeniero Civil. VSL Construction Systems S.A. Business Developer Manager. [david.martinez@vsl.com](mailto:david.martinez@vsl.com)

## **RESUMEN**

Dada su importancia estratégica y su exposición a condiciones ambientales adversas, el mantenimiento del Puente Centenario se ha convertido en un referente de innovación tecnológica. Este artículo describe las técnicas avanzadas de limpieza e inspección robotizada de tirantes utilizando inteligencia artificial (IA) y el uso de métodos no intrusivos para medir las fuerzas internas en los cables. Estas estrategias no solo aseguran la durabilidad y seguridad del puente, sino que también optimizan los recursos y minimizan las interrupciones operativas.

## **ABSTRACT**

Given its strategic importance and exposure to adverse environmental conditions, maintaining the Centenario Bridge has become a benchmark for technological innovation. This paper describes advanced techniques for robotic cleaning and inspection of stay cables using artificial intelligence (AI) and non-intrusive methods for measuring internal cable forces. These strategies not only ensure the bridge's durability and safety but also optimize resources and minimize operational disruptions.

**PALABRAS CLAVE:** Puente Centenario, inspección, inteligencia artificial, limpieza de tirantes, medición no intrusiva, mantenimiento de infraestructuras

**KEYWORDS:** Centenario Bridge, robotic inspection, artificial intelligence, stay cable cleaning, non-intrusive measurement, infrastructure maintenance.

## **1. Construcción del Puente Centenario**

El Puente Centenario, inaugurado en 2004, es una de las estructuras más destacadas de la infraestructura vial de Panamá. Ubicado sobre el Canal de Panamá, conecta la ciudad de Panamá con Arraiján, facilitando el tránsito de más de 30,000 vehículos diarios. Con una

longitud total de 1,052 metros y un vano principal de 420 metros, el puente también se distingue por su altura máxima de 184 metros y un gálibo de 80 metros que permite el paso de embarcaciones bajo su estructura.

El diseño del Puente Centenario combina estética y funcionalidad, empleando 128 tirantes en un plano central para soportar las cargas distribuidas. Estos tirantes son elementos críticos para la estabilidad de la estructura y requieren un mantenimiento constante debido a factores como la exposición a condiciones climáticas adversas y el desgaste por uso continuo.

En la última inspección, llevada a cabo por especialistas de VSL, se han implementado tecnologías avanzadas para optimizar la

inspección y mantenimiento de los tirantes. Estas incluyen la limpieza de los vainas, la inspección automatizada con inteligencia artificial (IA) y la medición no intrusiva de las fuerzas internas.

Este artículo analiza estas innovaciones tecnológicas, destacando su impacto en la seguridad, eficiencia y sostenibilidad del Puente Centenario.



Figura 1. Puente Centenario. Fotografía de VSL

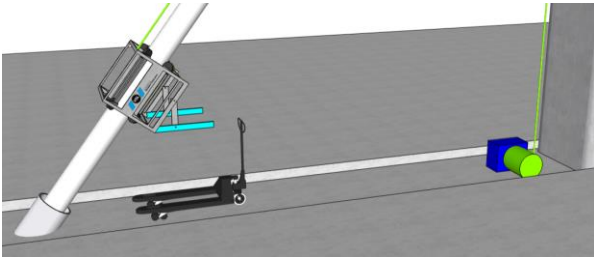
## 2. Tecnologías innovadoras de VSL

### 2.1 Limpieza de vainas

La acumulación de polvo, sal y materia orgánica en los tirantes puede comprometer su rendimiento y estética. Especialmente porque minimiza el efecto de coeficiente de arrastre de las hélices en las vainas, cuya función es aumentar la estabilidad contra fuerzas externas tales como el viento y la lluvia.

Para abordar este problema, se implementó un sistema de limpieza robotizada que utiliza agua a alta presión. El robot, equipado con válvulas de alta presión y sistema de tiro controlado con polipasto eléctrico, limpia las vainas en toda su longitud, asegurando una cobertura total de 360°.

El uso de robots no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también minimiza los riesgos para el personal. En promedio, el sistema puede limpiar entre 600 y 800 m de tirante al día, reduciendo significativamente el tiempo necesario para completar el mantenimiento de toda la estructura.



**Figura 2. Posicionamiento de equipos necesarios para la limpieza; robot y polipasto eléctrico**

El correcto posicionamiento de todos los elementos, especialmente el de las cuerdas o cables que tiran del robot de limpieza, permiten un desempeño óptimo en los tiempos, evitando el continuo acceso a las partes altas de la pila y asegurando el trabajo seguro de todo el personal involucrado.

Para ello, es lo ideal, antes de comenzar las actividades de mantenimiento, realizar una buena planificación que incluya el posicionamiento de todos los elementos, realizando dicha actividad por única vez en cada una de las pilas que constituyan el puente.



**Figura 3. Robot de limpieza en acción. Foto de VSL**

A su vez, la correcta planificación de los trabajos y el uso de los equipos adecuados, evitan el corte de tráfico, manteniendo la correcta circulación de los vehículos.



**Figura 4. Contraste de vainas antes y después de ser lavadas.**

## 2.2 Inspección de vainas con robot autónomo y uso de la IA

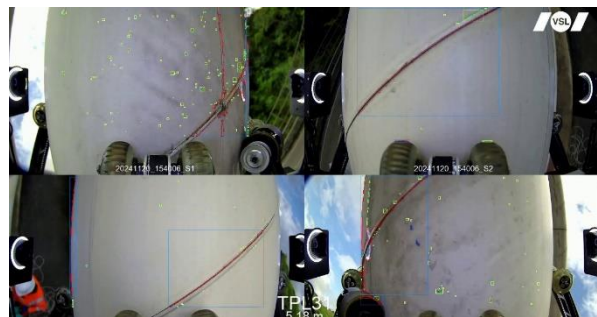
Las vainas, que encapsulan los cordones de los tirantes, ofrecen una protección ante las condiciones ambientales, tales como lluvia, viento, rayos UV, además de brindar estabilidad aerodinámica y disminuir los efectos vibracionales de la lluvia.

En este proyecto, se utilizó un robot autónomo diseñado por VSL que graba las vainas en toda su longitud y cubriendo los 360°, para luego, con el uso de una IA, también desarrollada por VSL, determinar todos los defectos que se encuentren, tales como grietas, agujeros, rayaduras, o cualquier otro defecto que pueda afectar el desempeño de las vainas.



**Figura 5. Robot de inspección de vainas en acción.**  
Foto de VSL

El sistema de IA analiza las imágenes capturadas, identificando patrones de deterioro y generando reportes detallados. Esta tecnología permite priorizar las intervenciones de mantenimiento y optimizar los recursos disponibles.



**Figura 6. Vista 360° y análisis con el uso de IA.**

Dada la autonomía y velocidad del robot, que es ideal para inspección de vainas que tengan un diámetro entre 140 y 315 mm, es posible inspeccionar 800 m diarios, lo que representa una solución muy eficiente y detallada para la inspección de estos elementos.

## 2.3 Inspección de anclajes y digitalización

Los anclajes son componentes esenciales que aseguran la transferencia eficiente de fuerzas desde los tirantes hacia la estructura principal del puente, por lo que es importante generar inspecciones detalladas a fin de garantizar el óptimo desempeño de todos los componentes.

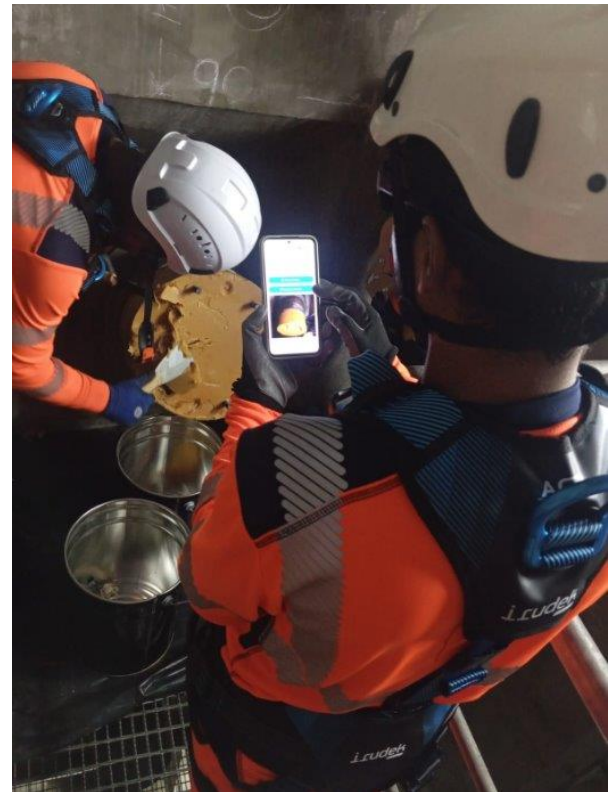
La inspección de los anclajes del Puente Centenario fue una de las actividades más destacadas del mantenimiento reciente. Se inspeccionaron un total de 256 anclajes activos y pasivos, empleando técnicas avanzadas que incluyeron el retiro de los capots y la evaluación detallada de los componentes internos, como cuñas, placas de anclaje y los extremos de los torones.



**Figura 7. Puntos de inspección de los anclajes en el Puente Centenario. Fotografías de VSL**

Durante la inspección, se retiraron y reinyectaron aproximadamente 17 toneladas de material de relleno protector (cera) para permitir una evaluación completa de los elementos internos.

Para lograr un buen análisis y adquisición de datos, la inspección de los anclajes se llevó a cabo con el uso de una aplicación digital que permite recabar toda la información, incluyendo fotografías y datos específicos de manera clara y ordenada. El uso de esta herramienta digital permite mayor tiempo de trabajo por parte de los ingenieros especialistas para analizar todos los datos recabados y generar un informe y recomendaciones más completas y detalladas.



**Figura 8. Toma de datos con herramientas digitales.**

## ***2.4 Medición no intrusiva de las fuerzas de los tirantes: uso de VibraTest***

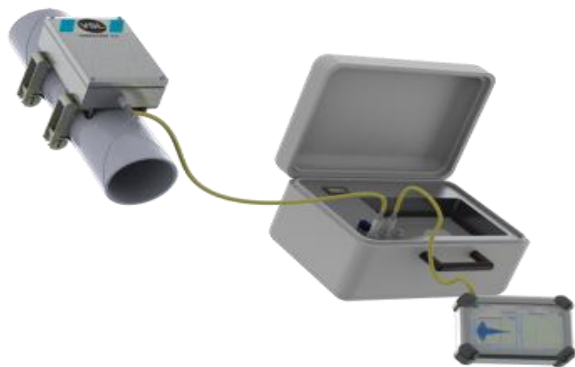
La medición de la tensión en tirantes de puentes es una tarea crítica en la construcción y mantenimiento de los puentes atirantados. Varios métodos se utilizan para abordar esta cuestión con precisión y eficiencia:

1. Pesaje mediante gato hidráulico unifilar o multifilar: Este enfoque implica la medición de la tensión en el cable del tirante utilizando un gato hidráulico.
2. Célula de carga unifilar: Se emplea una célula de carga especializada para evaluar la tensión en uno o varios tirantes.
3. Célula hidráulica global en anclaje: Se implementa una célula hidráulica para medir la tensión de manera integral en el punto de anclaje.
4. Medición basada en la frecuencia (VibraTest): Este método se basa en el cálculo de la tensión a partir del análisis

espectral de la respuesta vibracional del cable del tirante.

Durante la fase de construcción, es común utilizar los tres primeros métodos debido a la disponibilidad de equipo y acceso a los anclajes. La medición basada en la frecuencia se reserva principalmente para inspección y mantenimiento, especialmente cuando el acceso a los anclajes es limitado o imposible, evitando todos los trabajos intrusivos para llegar a los cordones.

El sistema VibraTest emplea un acelerómetro ubicado a una distancia accesible desde el tablero del puente (por encima de los tubos antivandálicos), sin necesidad de acceso específico. Este sistema, desarrollado por VSL, utiliza el principio de cuerda vibrante para realizar una medición directa y sencilla de la tensión en el cable del tirante a partir del espectro de vibración generado bajo excitación ambiental.



**Figura 9. Equipo VibraTest**

El funcionamiento se basa en la medición de la aceleración del cable y su posterior procesamiento mediante algoritmos específicos. El equipo incluye hardware personalizado, como acelerómetros y sistemas de adquisición de datos de alta frecuencia, junto con una computadora robusta y software especializado.



**Figura 10. Toma de datos de carga usando VibraTest**

La adquisición de datos y el cálculo de la fuerza se completan en aproximadamente 2 minutos.

El acelerómetro se aloja en una carcasa resistente y completamente sellada. Todas las demás partes electrónicas se integran en un maletín robusto que incluye baterías.

El sistema VibraTest ofrece una precisión comparable a la obtenida mediante pesaje con gato hidráulico. Además, para evaluar el amortiguamiento en los tirantes, se excita inicialmente el cable y se mide su respuesta libre a lo largo del tiempo.

El VibraTest no requiere ajustes in situ, siempre y cuando se disponga de los datos de entrada apropiados, como las características mecánicas del tirante. Este enfoque ha evolucionado significativamente en los últimos años gracias a su aplicación en numerosos puentes atirantados ejecutados por VSL.

La prueba de cuerda vibrante es reproducible periódicamente con recursos bajos y un impacto mínimo en el tráfico, ya que no requiere interrupciones significativas.

Para determinar la tensión del tirante, el acelerómetro se instala sobre la vaina a una distancia accesible desde el tubo antivandálico, y

se miden las aceleraciones durante, por lo menos, 2 minutos. Después de esto, el software, desarrollado por VSL, separa todas las frecuencias existentes y determina cuáles pertenecen a las frecuencias naturales del tirante.

Una vez determinadas las frecuencias en los diferentes modos de vibración, la tensión se calcula siguiendo:

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{m}}$$

Donde:

$f_n$  es la frecuencia en el modo  $n$  de vibración

$n$  es el número del modo de vibración

$L$  es la longitud libre de vibración

$F$  es la fuerza de tensión

$m$  es la masa de la cuerda en vibración (tirante) por unidad de longitud

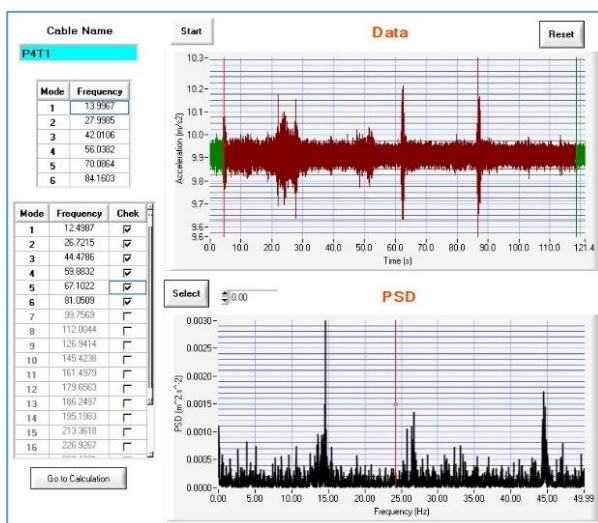


Figura 11. Aceleraciones y frecuencias determinadas por el software de VSL.

### 3. Impacto de las tecnologías

#### 3.1 Beneficios operativos

La integración de tecnologías revolucionaria ha reducido significativamente el tiempo asociado con el mantenimiento del

punto. Además, el uso de robots ha eliminado la necesidad de trabajos manuales en áreas de alto riesgo, mejorando la seguridad laboral.

#### 3.2 Impacto ambiental

Los sistemas automatizados emplean menos cuantía de recursos y generan menos residuos comparados con los métodos tradicionales. Esto refuerza el compromiso con la sostenibilidad en el mantenimiento de infraestructuras.

#### 3.3 Mejora en la toma de decisiones

La digitalización y el análisis de datos en tiempo real permiten una toma de decisiones más informada. Los reportes generados por los sistemas de inspección facilitan la planificación a largo plazo y aseguran intervenciones más efectivas.

#### 3.4 Una mirada al futuro cercano

El Puente Centenario ejemplifica cómo la aplicación de tecnologías avanzadas puede transformar el mantenimiento de infraestructuras complejas. Las soluciones descritas no solo garantizan la seguridad y la funcionalidad del puente, sino que también establecen un nuevo estándar para el sector.

El futuro del mantenimiento de puentes reside en la integración de tecnologías como la IA, la robótica y los métodos no intrusivos, asegurando que estas infraestructuras críticas sigan sirviendo a las comunidades de manera segura y eficiente.

### 4. Conclusiones

El mantenimiento del Puente Centenario ha sido un desafío que ha impulsado la implementación de tecnologías innovadoras para la limpieza, inspección y evaluación

estructural de sus tirantes. A través del uso de robots autónomos, inteligencia artificial y métodos de medición no intrusivos, se ha logrado optimizar los procesos de mantenimiento con beneficios significativos en términos de seguridad, eficiencia y sostenibilidad, llegando a las siguientes conclusiones:

1. La limpieza robotizada ha permitido reducir el tiempo de intervención y mejorar la seguridad operativa, eliminando la necesidad de trabajo manual en altura.
2. La integración de inteligencia artificial en la inspección de vainas ha facilitado la detección automatizada de defectos, mejorando la precisión y reduciendo la dependencia de inspecciones manuales.
3. El método VibraTest ha demostrado ser una alternativa eficiente y precisa para la medición de las fuerzas en los tirantes, sin requerir acceso directo a los anclajes ni interrumpir el tráfico vehicular.
4. La automatización ha minimizado los riesgos para el personal de inspección y ha reducido el impacto ambiental del mantenimiento, al emplear menos recursos y generar menor cantidad de residuos.

5. La digitalización de los datos y el análisis en tiempo real han mejorado la toma de decisiones, facilitando la planificación de intervenciones futuras y estableciendo un estándar para el mantenimiento de infraestructuras de esta magnitud.

El mantenimiento del Puente Centenario, a cargo de VSL, se consolida como un referente en la aplicación de tecnologías avanzadas para el mantenimiento de puentes atirantados. La combinación de robótica, inteligencia artificial y técnicas de inspección no intrusivas representa el futuro de la conservación de infraestructuras críticas, garantizando su durabilidad y funcionalidad a largo plazo.

## 5. Referencias bibliográficas

Feng, M. Q., Kim, D. Y., & Yi, J. H. (2015). "Cable Force Monitoring Using Vibration Measurements". *Structural Health Monitoring*, 14(2), 136-148.

VSL International (2024). "Advanced Cable Inspection and Maintenance Techniques". *Technical Report*, VSL Construction Systems S.A.

## Agradecimientos

VSL Construction Systems S.A. y VSL International quieren agradecer a todas las personas, empresas y entidades públicas que han contribuido a la finalización de este proyecto. En especial a CentroEquipos y el Ministerio de Obras Públicas de Panamá.