

Probabilistic evaluation of failure and reliability of the Huaripachi bridge structure using GPS technology and the Precise Point Positioning technique

Yvan Huaricallo Vilca ¹, Franklin Maylle Gamarra ², and Alfredo Romero Kana ³

^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú,

yhuaricallov@unmsm.edu.pe, franco.unmsm@gmail.com, al.ro.ka@hotmail.com

The objective of this article is to evaluate the probability of failure and reliability of the Huaripachi bridge structure through the Global Positioning System technology and the Precise Point Positioning technique. Evaluating the probability of failure (pf) and the reliability index (β) from the information of the semi-static and dynamic displacement of the structure is vital for the safety of the bridges, the displacements were determined by means of moving average and Chebyshev type I methods., while pf and β were evaluated using the deterministic and probabilistic method of statistics. The results of the investigation showed semi-static displacements of 4.96, 5.15 and 25.47 mm in longitudinal, transversal and vertical component respectively, with an absolute error of 2% in the vertical compared to the deterministic value (2.50 cm) of table 1 and the average measured value (2.547 cm), while in the dynamic displacement they reached 2.30, 3.18 and 12.36 mm in longitudinal, transversal and vertical component respectively, he probabilistic evaluation with a confidence level of 94% in the vertical component, the pf and β indicate that the structure is unsafe in the limit of [-1;1] mm with pf of 51.54 % and with small β , and in the limit of [-5;5] mm the pf is 0.49 %, which is minimal and with β of 4.42, which indicates that the structure it is safer and more reliable.

Keywords—Displacement, semi-static, dynamic, PDF, probability of failure, reliability index, moving average, Chebyshev.

Evaluación probabilística de falla y confiabilidad de la estructura del puente Huaripachi mediante la tecnología GPS y la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso

Yvan Huaricallo Vilca¹, Franklin Maylle Gamarra², and Alfredo Romero Kana³
^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú,
yhuaricallo@unmsm.edu.pe, franco.unmsm@gmail.com, al.ro.ka@hotmail.com

El objetivo del presente artículo es evaluar la probabilidad de falla y confiabilidad de la estructura del puente Huaripachi mediante la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global y la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso, se evaluó la probabilidad de falla (pf) y el índice de confiabilidad (β) a partir de la información del desplazamiento semi – estático y dinámico de estructura es vital para la seguridad en los puentes, los desplazamientos se determinaron mediante métodos de media móvil y Chebyshev tipo I, mientras que la pf y el β se evaluaron por medio del método determinístico y probabilístico de la estadística. Los resultados de la investigación arrojaron desplazamientos semi – estático de 4.96, 5.15 y 25.47 mm en componente longitudinal, transversal y vertical respectivamente, con un error absoluto de 2% en la vertical frente al valor determinístico (2.50 cm) de la table 1 y el valor promedio medido (2.547 cm), mientras que en el desplazamiento dinámico llegaron ser de 2.30, 3.18 y 12.36 mm en componente longitudinal, transversal y vertical respectivamente, la evaluación probabilístico con un nivel de confianza de 94% en el componente vertical de pf y β indican que la estructura es insegura en el límite de [-1;1] mm con pf de 51.54 % y con β pequeño, y en el límite de [-5;5] mm la pf es de 0.49 % lo cual es mínimo y con el β de 4.42 lo que indica que la estructura es más segura y confiable.

Palabras clave—Desplazamiento, semi – estático, dinámico, PDF, probabilidad de falla, índice de confiabilidad, media móvil, Chebyshev.

I. INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 90's, se implementaron las observaciones de los sistemas de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) para monitorear grandes estructuras [1],[2],[3],[4]. Los receptores GPS actúan como sensores de deformación dinámica que permiten evaluar e identificar las características estructurales, brindando a los ingenieros información valiosa para su evaluación. Los desarrollos futuros en la tecnología de generación y aplicación de datos se analizan en el contexto de las necesidades de alarmas en tiempo real y evaluación de estructuras de ingeniería [1].

A nivel mundial, la infraestructura básica denominada puentes están en condiciones de envejecimiento y deterioro más allá de su periodo de vida útil del diseño, esto es

preocupante y requiere procedimiento de evaluación de puentes eficientes, rentables y confiables, para ello es de suma importancia realizar un control en tiempo real en condiciones normales de operatividad [2].

La tecnología GPS se ha aplicado exitosamente en el monitoreo de la estabilidad de taludes para aplicaciones de riesgo de deslizamientos de tierra, topografía de precisión, sismología. Sin embargo, su uso se ha ampliado en el monitoreo de infraestructuras civiles como presas, edificios y puentes [2]. El GPS a diferencia de un acelerómetro nos proporcionan desplazamientos directos en tiempo real sin ningún método de integración y con precisión suficiente para evaluar el comportamiento de la estructura de puentes [2].

En las últimas décadas, el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP, por sus siglas en inglés) se ha convertido en una poderosa técnica y con uso frecuente para determinar las coordenadas de un punto utilizando un único receptor. Por otro lado, no requiere una estación de referencia en procesamiento de la información de observación para obtener las coordenadas tridimensionales de alta calidad, dando una solución donde se requiere posicionamiento y navegación precisos en ubicaciones aisladas o áreas amplias, donde la infraestructura de la estación de referencia no está disponible [3].

De acuerdo al análisis realizado por [4] sobre causas de falla en los puentes, afirman que las fallas ocurren en los errores del diseño de puente, errores en proceso constructivo, sistemas hidráulicos, colisiones y sobrecargas, lo que da como resultado más de 70 % de fallas en los puentes, así mismo afirma diferentes causas que se clasifica en causas internas (error de diseño, error de construcción y falta de mantenimiento) y causas externas (hidráulicas, sobrecarga y colisión). Por otro lado, es crítico que los puentes tengan suficientes medidas de protección de redundancia y capacidad para reducir la probabilidad de falla del puente debido a una sobrecarga. Por lo tanto, la probabilidad de falla por sobrecarga y colisión es crítico en los puentes de carretera, por ende, se debe prestar especial atención a la estabilidad estructural y la fatiga.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar la probabilidad de falla y confiabilidad de la estructura del puente Huaripachi mediante la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global y la técnica de Posicionamiento Puntual Preciso.

B. Objetivos específicos

- Determinar las series temporales correspondientes al desplazamiento aparente Longitudinal, Transversal y Vertical del puente.
- Analizar y aplicar filtros a las series temporales para extraer el desplazamiento semi-estático real de la estructura.
- Analizar y aplicar filtros a las series temporales para extraer el desplazamiento dinámico real de la estructura.
- Analizar las 5 funciones de distribución de probabilidad y elegir la que mejor se ajuste a los datos del desplazamiento dinámico.
- Determinar la probabilidad de falla y el índice de confiabilidad de la estructura del puente.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El Puente Huaripachi se encuentra ubicado en el Km 22 de la carretera central del Distrito de Matucana, Provincia de Huarochiri y Departamento de Lima – Perú, en el tramo de la carretera central se encuentra un serie de puentes que facilita el acceso y desarrollo económico del país debido a gran dinamismo que tiene el comercio en traslado de mercancías de grandes empresas mineras y agrícolas de sierra y selva central del país, a través de esta vía transitan grandes vehículos pesados de tipo autos, buses, camión, semi-tráiler y tráiler. En este contexto, la vigilancia y monitorear de las infraestructuras llamado puentes con tecnologías sofisticados y técnicas eficientes, efectivos y confiables es de suma importancia que minimice el deterioro y colapso del puente.



Fig. 1 Puente huaripachi en condiciones normales de operación vehicular.
Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 1 muestra el puente huaripachi en condiciones normales de operación, lo cual tiene una longitud de 40 m entre juntas y un ancho de 11.50 m que sostiene dos carriles de doble sentido, con vigas principales de hormigón pretensados y toda la superestructura descansa sobre un apoyo de tipo elastómero.

En esta investigación se utilizó un receptor geodésico GPS modelo NETRS, cuya antena TRM41249.00 fue instalado sobre la baranda de concreto en el margen derecho y centro de la longitud del puente Huaripachi, exactamente en la coordenada UTM 8690744.489 m Norte, 349742.608 m al Este y su altura elipsoidal de 2439.562 m proyectado al sistema WGS84, tal como se muestra en la Fig. 2. La adquisición de datos binarios fue durante 1 hora con 36 minutos y 36.70 segundos aproximadamente del día 27 de abril del 2023, con un registro de muestreo de 10 Hz y máscara de elevación de 5 grados.



Fig. 2 Instalación de la antena geodésica GPS en la baranda de concreto del puente.

Fuente: Elaboración propia.

El presente estudio se adapta a la investigación mixta que se clasifica [5] en: Primero según su objetivo es de tipo aplicada, se aplica conceptos teóricos, prácticos y científicos extraídos de libros y/o artículos para fortalecer nuestro tema de investigación. Segundo según su naturaleza de datos, la cual es de tipo cuantitativo que consiste en emplear modelos matemáticos y estadísticos, teorías relacionado al tema de interés. Finalmente, la tercera según su manipulación de variables, la cual es de tipo campo, que consiste en recolección de datos numéricos en ambientes reales que se necesitan para hacer la investigación [6]. La Fig. 3 muestra el flujograma de los procesos a seguir durante la investigación.

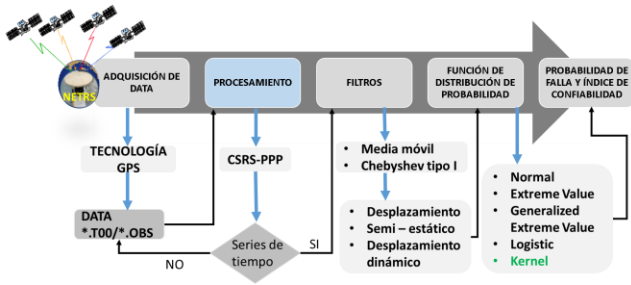


Fig. 3 Flujograma para determinar el determinar la probabilidad de falla (pf) y el índice de confiabilidad (β) del puente Huaripachi.

Fuente: Elaboración propia.

IV. ESTRATEGIA DE PROCESAMIENTO DE DATOS GPS

Para el procesamiento y análisis de datos GPS se realizó mediante técnica de Posicionamiento Puntual Preciso (PPP), lo cual permite determinar la posición y series de tiempo a partir de datos de observaciones de un único receptor GNSS [7]. En este caso no se aplican técnicas de diferenciación, sino que solo se consideran las correcciones al oscilador del satélite y sus efemérides orbitales como parámetros conocidos en el cálculo, además se utilizan las combinaciones lineales de frecuencias para corregir el efecto de la ionosfera [8]. [9] iniciaron con la investigación rigurosa de las ecuaciones de observación iniciales del posicionamiento GPS, iniciando de esta manera documentada con el uso de la técnica PPP-GNSS [10].

El modelo matemático del posicionamiento puntual preciso (PPP) es una técnica poderosa para procesar observables de un solo receptor GNSS sin recurrir a otras receptoras de referencia. Para un receptor GNSS de doble frecuencia, los observables de pseudodistancia y fase portadora en L1 y L2 entre un receptor R y el satélite S pueden describirse mediante la siguiente ecuación [11].

$$P_{L_i}^S = \rho_R^S + c(dT_R - dt^S) + d_{orb}^S + d_{trop}^S + d_{ionL_i}^S + d_{hdP_i}^S - d_{hdP_i}^R + d_{multP_i}^S + \varepsilon_{P_i} \quad (1)$$

$$\Phi_{L_i}^S = \rho_R^S + c(dT_R - dt^S) + d_{orb}^S + d_{trop}^S - d_{ionL_i}^S + \lambda_{L_i} N_{L_i} + d_{hdP_i}^R - d_{hdP_i}^S + d_{multP_i}^S + \varepsilon_{\Phi_i} \quad (2)$$

Donde:

$P_{L_i}^S$ es pseudodistancia, $\Phi_{L_i}^S$ es fase portadora, L_i es la frecuencia, ρ_R^S es la distancia geométrica entre el satélite y receptor, c es la velocidad de la luz, dT_R y dt^S son error en el reloj del receptor y del satélite respectivamente, d_{orb}^S es el error de la órbita satélite, d_{trop}^S es la troposfera diaria, $d_{ionL_i}^S$ es el efecto ionosférico de primer orden en la frecuencia L_i , $d_{hdP_i}^R$ y $d_{hdP_i}^S$ son los retrasos del hardware del satélite y del receptor, respectivamente, para el pseudodistancia en L_i , $d_{hdP_i}^R$ y $d_{hdP_i}^S$ son los retrasos del hardware del satélite y del receptor, respectivamente, para la fase portadora en L_i , $d_{multP_i}^S$ y $d_{multP_i}^R$ son los errores de multipath en el pseudodistancia y la fase portadora respectivamente en la frecuencia L_i , ε_{P_i} y ε_{Φ_i} son los errores del ruido en el

pseudodistancia y en la fase portadora respectivamente en L_i , λ_{L_i} y N_{L_i} son longitud de onda y ambigüedades cíclicas en la frecuencia L_i .

Para reducir los errores, se recomienda usar las correcciones precisas de órbita y reloj, cuya ecuación es de la siguiente manera.

$$P_{if} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (3) \quad \text{y} \quad \Phi_{if} = \frac{f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (4)$$

Donde P_{if} es el código de combinación en la ionosfera libre, Φ_{if} es la fase de combinación en la ionosfera libre, f_i es la frecuencia de L_i en Hz.

La estrategia de procesamiento adoptada con el Servicio de Posicionamiento Puntual Preciso del Sistema de Referencia Espacial Canadiense (CSRS-PPP) incluye la aplicación de variables que intervienen en un procesamiento científico, estas variables son las Órbitas Precisas del IGS, efemérides finales, correcciones de reloj, Parámetros de Rotación de la Tierra (EOP), Marea de Carga Oceánica, cargas Atmosféricas y estimación de sesgos derivado de una red de estaciones de referencia globales que permiten posicionamiento preciso en todo el mundo referenciado al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF2020) [12].

Finalmente se emplea el método de filtrado media móvil, pasa alto, Chebychev tipo I de orden 8, a partir de los resultados se emplearon la función de densidad de probabilidad (PDF), chi cuadrado (χ^2), etc. para la prueba de hipótesis en la distribución de nuestras observaciones, lo cual permite si aceptamos o rechazamos nuestra hipótesis de la probabilidad de falla (Pf) [13].

3.1. Estado límite de deformación del puente

Para el diseño y construcción de puentes en Perú, se usan normas y manuales de puentes, manual de carreteras y otros emitidos por el Ministerio de Transporte y Comunicación (MTC, 2018) que sirven de ayuda para cumplir las consideraciones generales del proyecto, así como las normas extranjeras como el AASHTO [14]. El AASHTO indica especificaciones técnicas para el diseño, construcción, mantenimiento y rehabilitación de puentes siguiendo la metodología del diseño por factores de carga y resistencia (LFRD) [15].

TABLA 1

ESTADO LÍMITES DE DEFORMACIÓN EN EL DISEÑO DEL PUENTE, CASO PUENTE HUARIPACHI.

CARGA	Estado Limite	Longitud del tramo centro a centro del apoyo L (m)	Limite (cm)
Tablero sin tráfico peatonal	L/800	20	±2.5

Tablero con tráfico peatonal limitado	L/1000	20	± 2.0
Tablero con tráfico peatonal significativo	L/1200	20	± 1.7

De acuerdo al manual de puentes (2018) en el apartado de criterios por deflexión de la sección de deformación de tableros metálicos reticulado, livianos metálicos y de concreto, indica que el estado limite debe satisfacer los efectos excesivos de deformación del tablero incluyendo la deflexión causada por la carga viva más la carga dinámica no debe exceder los criterios que se muestra en la tabla 3.

3.2. Transformación de coordenadas

Para un buen análisis del desplazamiento del puente es necesario realizar la transformada de coordenadas topo – céntricas a las coordenadas relacionadas con los ejes del puente, es decir, un eje a lo largo del puente (eje longitudinal) y un eje normal a la longitud del puente (eje transversal) [16]. Para hacer esto, se debe medir y calcular el azimut del puente, cuyo valor del azimut (θ) es de 12. 21° del Puente Huaripachi entre los puntos A y B tal como se muestra en la Fig. 4. Con el azimut y la ecuación 5 y 6 se procede a realizar la transformada de coordinas y su serien de tiempo del desplazamiento aparente se muestra en la Fig. 5.

$$T = N \cos(\theta) + E \sin(\theta) \quad (5)$$

$$L = -N \sin(\theta) + E \cos(\theta) \quad (6)$$



Fig. 4 Transformada de coordenadas topoc-entrías a las coordenadas de referencia del puente.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Desplazamiento semi – estático

A partir de las coordenadas del puente se procedieron a realizar el cálculo de desplazamientos aparente con la ecuación 7, esto fue necesario para llevar las coordenadas a la unidad milimétrica y realizar los filtros necesarios en lenguaje de programación Matlab.

$$x_i = e_i - \frac{1}{r} \sum_{i=0}^{N-1} x(i+j) \quad (7)$$

Donde e_i es la señal de entrada (L, T y U), x_i es la señal de salida en mm y L, T y U son ejes longitudinal, transversal y vertical del puente respectivamente, tal como se muestra en la Fig. 4.

Para extraer los desplazamientos semi – estáticos se utilizó el filtro de media móvil con una ventana de 500, cuya ecuación se define por la siguiente expresión.

$$y_i = \frac{1}{r} \sum_{i=0}^{N-1} x(i+j) \quad (8)$$

Donde x_i es la señal de entrada, y_i es la señal de salida en mm y N es el número total de muestras.

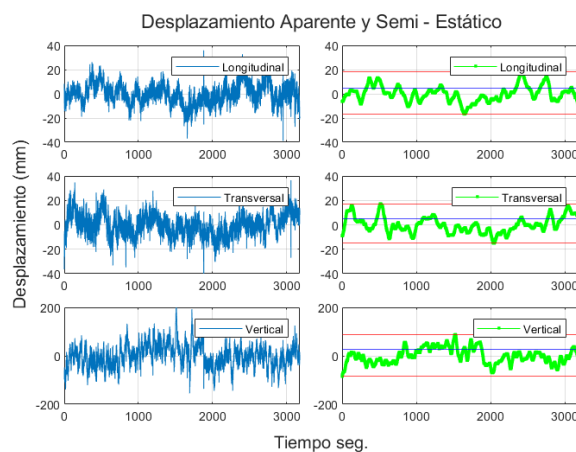


Fig. 5 Desplazamiento aparente (derecha) y el desplazamiento semi – estático (Izquierda) del puente Huaripachi.

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 5 muestra los desplazamientos aparentes registrados por el equipo geodésico NETRS (izquierdo) y desplazamientos semi – estático (derecho) de la estructura del puente Huaripachi extraído por el filtro media móvil con una ventana de 500, las líneas horizontales de color rojo representan desplazamiento mínimo y máximo, mientras que la línea horizontal de color azul representa promedio del desplazamiento. La estructura del puente presenta desplazamientos semi – estático mínimo, máximo y promedio de -16.78 mm, 17.86 mm y 4.96 mm respectivamente a lo largo del eje longitudinal (grafica superior), mientras que el eje transversal (grafica del centro) presenta -15.11 mm, 17.31 mm y 5.15 mm, finalmente el eje vertical (grafica inferior) del puente presenta desplazamientos semi – estático de -85.11 mm, 88.14 mm y 25.47 mm, con un error absoluto de 2.0 % en el vertical frente a la comparación con el límite de deformación o deflexión del Puente establecido por ASHTO mostrado en la tabla 1.

3.4. Desplazamiento dinámico

Los filtros de chebyshev de tipo I son filtros que dependen de los parámetros de orden del filtro, frecuencia de corte y rizado constante en la banda de paso y en la banda

eliminada presenta características monotónicas, cuya ecuación matemáticamente se define como sigue [11].

$$|H(\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 T_n^2(\Omega)} ; 0 < \epsilon \leq 1 \quad (9)$$

Donde ϵ es un parámetro relacionado con el rizado del filtro, $T_n(x)$ es el polinomio de chebyshev y finalmente n es el orden de filtro.

$$T_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \cos^{-1}(\Omega)) & ; |\Omega| \leq 1 \\ \pm \cosh(n \cosh^{-1}(\Omega)) & ; |\Omega| > 1 \end{cases} \quad (10)$$

El polinomio de chebyshev se puede obtener de la siguiente ecuación recursiva.

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x) ; n = 1, 2, \dots \quad (11)$$

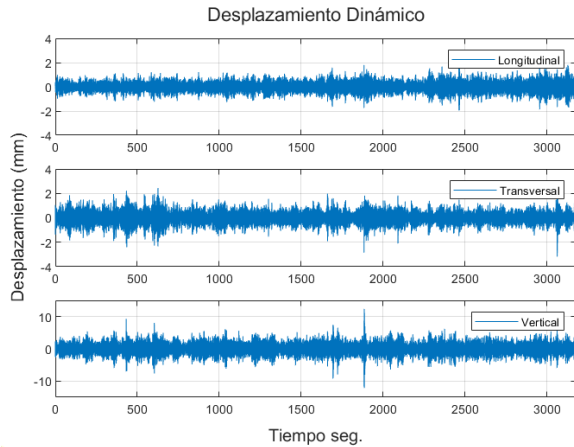


Fig. 6 Desplazamiento dinámico del puente Huaripachi.

Fuente: Elaboración propia.

La extracción del desplazamiento dinámico se realizó por medio del filtro Chebyshev tipo I de orden 8, con una frecuencia de corte de 0.6 Hz dividido por la frecuencia de Nyquist (frecuencia de muestreo entre 2) y con un rizado de 30, este tipo de filtro resuelven problemas de señales no periódicos a partir de sus expresiones polinómicas ortogonales, definido por la expresión 12.

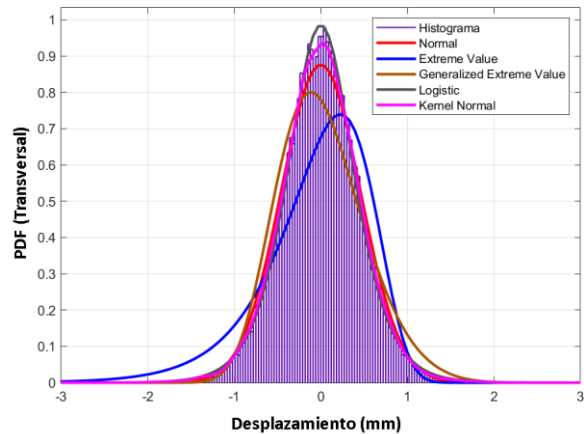
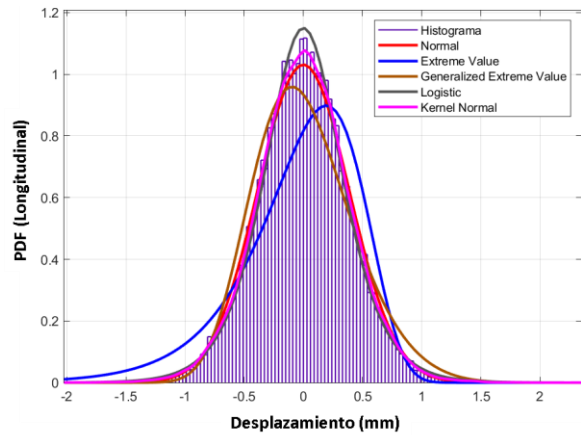
$$T_8(x) = 128x^8 - 256x^6 + 160x^4 - 32x^2 + 1 \quad (12)$$

Donde $\Omega = x = \omega/\omega_0$ es la frecuencia normalizada, $T_8(\Omega)$ es el polinomio normalizado de Chebyshev tipo I de orden n .

La Fig.6 muestra el desplazamiento dinámico del puente, cuyo desplazamiento varía de $\pm 2.30 \text{ mm}$ para el componente longitudinal y $\pm 3.18 \text{ mm}$ para el componente transversal, mientras que para el componente vertical el desplazamiento fluctúa en $\pm 12.36 \text{ mm}$ aproximadamente, la media para los tres componentes es de 0.30, 0.35 y 1.25 mm respectivamente, de acuerdo a los resultados se infiere que el componente transversal y vertical presentan desplazamiento mayores a diferencia del componente longitudinal, esto se debe al efecto de sobrecarga dinámica de vehículos pesados que transita por el puente, la deformación ocasionado por los vehículos son deformaciones recuperables, ya que su periodo de desplazamiento son cortos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la probabilidad de falla del puente Huaripachi, se analizó las funciones de densidad de probabilidad (PDF), lo cual se define como la herramienta estadística que describe la distribución de probabilidad de una variable aleatorio continua, estos son usados ampliamente en diversos campos de investigación de ciencia e ingeniería. Con la finalidad de evaluar el ajuste de la distribución de muestras de desplazamiento dinámico del puente se generaron cinco funciones de distribución de probabilidad en MATLAB para cada componente del desplazamiento dinámico tal como se observa en la Fig. 6, estas son: Normal, Extreme Value, Generalized Extreme Value, Logistic y Kernel Normal, cada uno de ellos se evaluó mediante la prueba de bondad de chi-cuadrado (χ^2) [11].



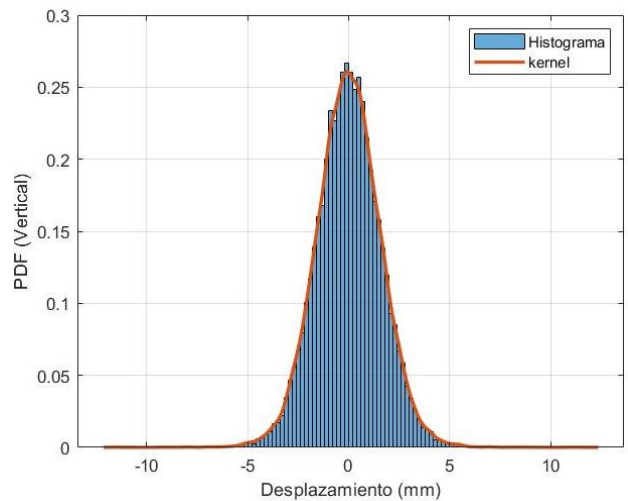
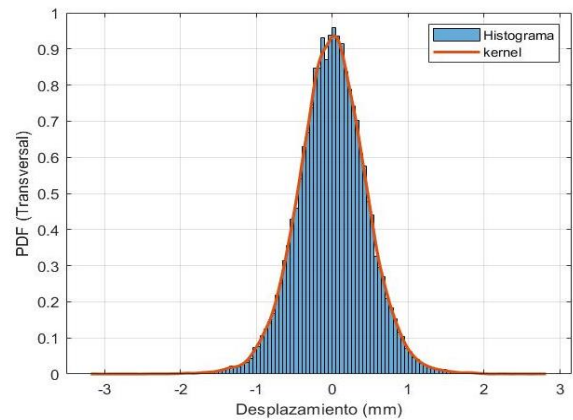
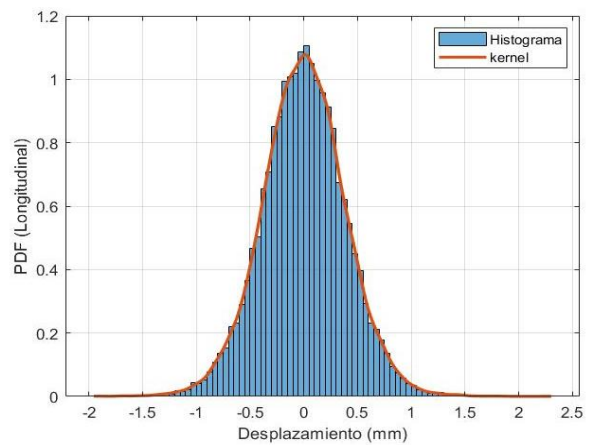
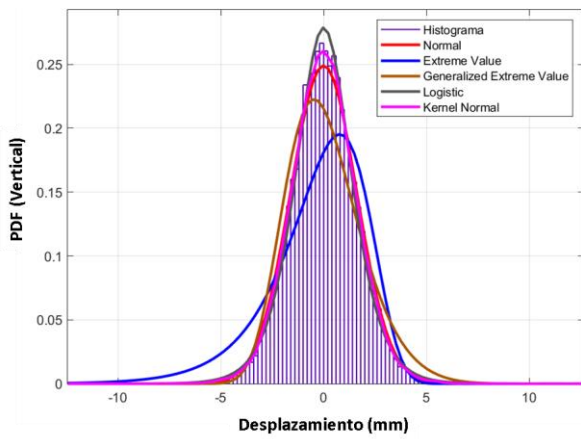


Fig. 7 Evaluación del ajuste del desplazamiento dinámico del puente Huaripachi con 5 (Normal, Extreme Value, Generalized Extreme Value, Logistic y Kernel Normal) funciones de distribución de probabilidad (PDF) con un nivel de confianza de 95 % en los 3 componentes Longitudinal, Transversal y Vertical respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 7 muestra la función de densidad de probabilidad generado a partir de los datos del desplazamiento dinámico extraído por el filtro de Chebyshev tipo I con un nivel de confianza de 95 %, en donde se observa claramente el ajuste de las cinco distribuciones generadas por PDF y en la Fig. 8 se muestra la distribución que mejor se ajustó a los desplazamientos dinámicos en los tres componentes, esto es la PDF Kernel Normal. Según el análisis realizado por [17] la distribución Kernel proporciona una alternativa más robusta al gráfico de densidad de probabilidad (PDP) de uso común cuando se visualizan datos de frecuencia. La estimación de la densidad del kernel estima la frecuencia de los datos sumando un conjunto de distribuciones gaussianas, pero a diferencia del gráfico de densidad de probabilidad, no tiene en cuenta la incertidumbre analítica. Esto es particularmente útil para buscar un grupo de análisis en espectros de datos. Se calcula usando la ecuación 13, cuyos resultados se observa en la Fig. 8 y las tablas 3.

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \quad (13)$$

Donde $K(x)$ es la función del núcleo o función de peso y h es el ancho de banda o conocido como el parámetro de suavización.

Fig. 8 Funciones de Distribución de Probabilidad (PDF) que mejor se ajustó a los desplazamientos dinámicos es la distribución de Kernel Normal en los 3 componentes Longitudinal, Transversal y Vertical con un nivel de confianza de 97, 93 y 94 % respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

Los valores medios (μ) y sigma (σ) de cada distribución se muestra en la tabla 2, lo cual fue utilizado para la prueba de bondad de χ^2 con el algoritmo elaborado en MATLAB.

TABLA 2
LA MEDIA Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.

DISTRIBUCIÓN CON UN NIVEL DE CONFIANZA 95 %						
PDF	Longitudinal		Transversal		Vertical	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Normal	0.00	0.39	0.00	0.46	0.00	1.60
Extreme Value	0.19	0.41	0.19	0.41	0.78	1.88
Generalized Extreme Value	-0.16	0.39	-0.19	0.47	-0.69	1.67
Logistic	0.00	0.22	0.00	0.25	0.00	0.90
Kernel Normal	Kernel = normal Bandwidth = 0.049 Support = unbounded		Kernel = normal Bandwidth = 0.057 Support = unbounded		Kernel = normal Bandwidth = 0.202 Support = unbounded	

La tabla 3 muestra el resultado de la diferencia entre los valores observados y esperados de las distribuciones evaluadas mediante la prueba de bondad de chi-cuadrado (χ^2), lo cual se utiliza para determinar si los datos provienen de una distribución de probabilidad específica, donde el parámetro h solo puede tomar valores de un 1 o un 0 durante la prueba, cuando el valor de h es 1 significa que los datos no se ajustan a la distribución de probabilidad por tanto se rechaza la hipótesis, si el valor de h es 0 significa que los datos se ajustan a la distribución de probabilidad por tanto se acepta la hipótesis, el parámetro p es la prueba de hipótesis que fluctúa entre 0 a 1, en el parámetro chi2stat se almacenan información sobre la estadística de la prueba y finalmente el ultimo parámetro df son los grados de libertad de la distribución. De acuerdo a los análisis realizados con la prueba de bondad, la distribución de probabilidad que más ajuste es la distribución Kernel Normal, con un valor de h = 0 para los tres componentes, df=8 para componente planas y un df=7 para componente vertical, con prueba de hipótesis (p) de 97, 93 y 94 % y con valores de chi2stat son 2.25, 3.12, 2.28 para los tres componentes en el orden de la tabla 3, estos valores indican el comportamiento probabilístico más realista de los desplazamientos dinámicos del puente, por lo tanto se acepta el hipótesis.

TABLA 3
PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE (X2) DE LAS CINCO DISTRIBUCIONES EVALUADAS.

PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE DE CHI-CUADRADO (χ^2)												
PDF	Longitudinal				Transversal				Vertical			
	h	p	chi2stat	df	h	p	chi2stat	df	h	p	chi2stat	df
Normal	1	0	132.39	4	1	0	540.67	4	1	0	191.37	3
Extreme Value	1	0	5302.20	5	1	0	12490.00	5	1	0	4299.80	4
Generalized Extreme Value	1	0	1923.80	4	1	0	3290.20	3	1	0	2587.20	3
Logistic	1	0	119.80	7	1	0	55.94	6	1	0	40.58	5
Kernel Normal	0	0.97	2.25	8	0	0.93	3.12	8	0	0.94	2.28	7

Mediante el resultado de la tabla 3 y la Fig. 8 se confirma que la distribución Kernel es la que mejor se ajusta a los datos del desplazamiento dinámico para evaluar la probabilidad de falla (pf) y el índice de confiabilidad del componente vertical del puente Huaripachi, la probabilidad de falla hace referencia a la seguridad de la estructura del puente ya que esto debe ser bajo durante el diseño y se calcula mediante la ecuación 14, entonces empezaremos calculando la pf como [2].

$$P_f = 1 - P(a < X \leq b) \quad (14)$$

Donde X representa el desplazamiento dinámico, mientras que a y b son los límites que define el nivel de seguridad del puente [10]. La Fig. 9 muestra cómo se debe determinar la pf utilizando los límites a y b en mm.

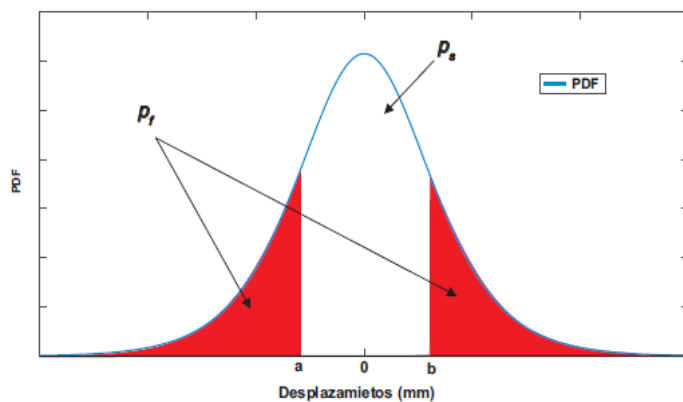


Fig. 9 Probabilidad de falla (pf) y de seguridad (ps) bajo la curva de PDF y los límites de los desplazamientos dinámicos.

Fuente: Vazquez Ontiveros.

De la ecuación 14, la probabilidad $P(a < X \leq b)$ se calcula como [13]:

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (15)$$

Donde $f_X(x)$ es la PDF del desplazamiento definido en la ecuación 13, bajo ciertas consideraciones previo. Por lo tanto, los resultados de probabilidad de falla (pf) e índice de confiabilidad (β) obtenido por medio de un algoritmo

elaborado en Matlab se muestran en la tabla 4 y las Fig. 10 y Fig. 11.

TABLA 4
PROBABILIDAD DE FALLA E ÍNDICE DE CONFIABILIDAD A PARTIR DE LA PDF KERNEL QUE MEJOR SE AJUSTÓ AL DESPLAZAMIENTO DINÁMICO.

Probabilidad de falla (pf) y índice de confiabilidad (β)		
PDF Kernel		
Límite (mm)	pf	β
[-1; 1]	0.5154	-0.0625
[-2; 2]	0.2009	1.2969
[-3; 3]	0.0598	2.4647
[-4; 4]	0.0168	3.4612
[-5; 5]	0.0049	4.4178

Probabilidad de falla desde la PDF Kernel

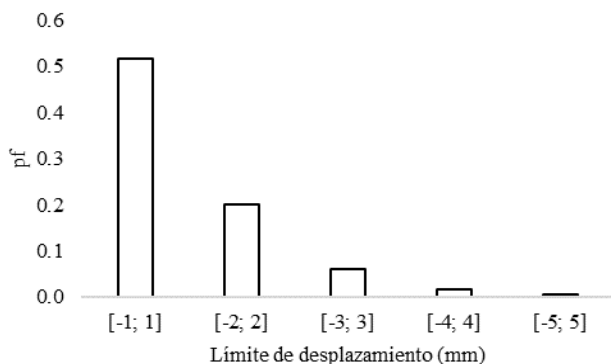


Fig. 10 Probabilidad de falla (pf) vs límites de los desplazamientos dinámicos.
Fuente: Elaboración propia.

Índice de confiabilidad desde la PDF Kernel

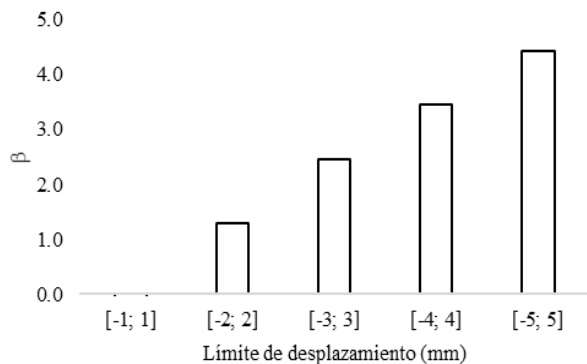


Fig. 11 Índice de confiabilidad (β) vs límites del desplazamiento dinámico.
Fuente: Elaboración propia.

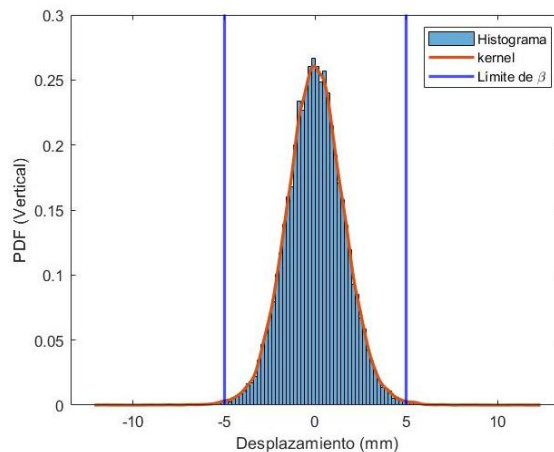


Fig. 12 Límite del índice de confiabilidad (β) para el puente Huaripachi, análisis correspondiente al componente vertical.

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 10, Fig. 11 y Fig. 12 muestra la probabilidad de falla (pf), índice de confiabilidad (β) y el límite máximo de β en función del desplazamiento dinámico, calculado a partir de la distribución de Kernel, ya que estadísticamente fue la más precisas en el ajuste de datos del desplazamiento dinámico con un nivel de confianza de 94%. Nos enfocaremos el análisis en el componente vertical ya que este componente es la que presenta mayor desplazamiento ya sea semi – estático y dinámico; en la Fig. 10 y la tabla 4 se observa que en el límite [-1;1] mm la probabilidad de que falle la estructura es alrededor de 51.54% y para los límites máximos considerados como el [-5;5] mm la probabilidad de que falle la estructura es mínima con 0.49% de pf, más allá al límite máximo la probabilidad de falla es prácticamente cero (pf = 0), esto quiere decir que cuanto menor sea el valor de probabilidad de falla será más confiable la estructura del puente; mientras que la Fig. 11 y la tabla 4 representa los índices de confiabilidad, donde los limites superiores tienen valores mayores a 4.42, cuanto mayor sea el valor del índice de confiabilidad más confiable será la estructura del puente, tal como se muestra en la Fig. 12.

VI. CONCLUSIÓN

La tecnología de Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y la técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP) más el método de filtrado media móvil y de Chebyshev tipo I han demostrado ser efectivos para determinar el desplazamiento semi – estático y dinámico en las respuestas estructurales del puente Huaripachi. Los GPS's a diferencia de un acelerómetro determinan directamente los desplazamientos sin que acudamos a otros métodos como la integral que se usa en datos de acelerómetro, la tecnología se utiliza para monitorea una amplia gama de estructuras que va desde la obtención de las respuestas estructurales muy lentas debido a las variaciones de temperatura y radiación solar, así como la

respuesta dinámica debido al viento y de vehículos pesados que ocasionan fatiga al puente debido al sobrepeso que ocasionan los vehículos pesos.

El uso del método estadístico como son los métodos determinísticos y probabilísticos en estudio de desplazamientos semi – estático y dinámico nos permitió evaluar la probabilidad de falla (pf) e índice de confiabilidad (β) de la estructura del puente. Los resultados del desplazamiento semi – estático se encuentran por encima del límite de estado de deformación establecido por el Ministerio de Transporte y Comunicación del Perú y las normas internacionales AASHTO [14] con un error absoluto de 2 % en comparación con valores determinísticos (2.50 cm) de la table 1 y el valor promedio medido (2.547 cm) en componente vertical, lo que indica que el puente puede presentar comportamiento inadecuado a futuro, esto no significa que el puente se va colapsar, pero es importante una evaluación permanente por parte de las autoridades competentes que esta carga de gestionar y administrar los puentes en nuestro país.

Los resultados probabilísticos con un nivel de confianza de 94% de pf y β indican que los desplazamientos dinámicos de la estructura son inseguros en el límite de [-1;1] mm con una probabilidad de falla de 51.54% cuyo índice de confiabilidad es prácticamente cero lo que indica no confiable y en el límite máximo de [-5;5] mm la probabilidad de falla es de 0.49 % lo cual es mínimo y el índice de confiabilidad en este límite es de 4.42 lo que indica que la estructura es más segura y confiable tal como se observa en la Fig. 12 con un nivel de confianza de 94%. La investigación de este artículo se realizó en condiciones normales del tráfico y para mejorar los métodos de evaluación empleada se recomienda una evaluación complementaria de los estados límites de resistencia.

REFERENCIAS

- [1] Roberts, G. W., Meng, X., Psimoulis, P., & Brown, C. J. (2020). Time Series Analysis of Rapid GNSS Measurements for Quasi-static and Dynamic Bridge Monitoring. En J.-P. Montillet & M. S. Bos (Eds.), *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences* (pp. 345-417). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21718-1_12
- [2] Vazquez B., G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Bennett, R., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, I. E. (2017). Structural evaluation of dynamic and semi-static displacements of the Juarez Bridge using GPS technology. *Measurement*, 110, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.026>
- [3] Xu, Y. (2016). GNSS precise point positioning with application of the equivalence principle.
- [4] Zhang, G., Liu, Y., Liu, J., Lan, S., & Yang, J. (2022). Causes and statistical characteristics of bridge failures: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(3), 388-406. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.12.003>
- [5] Hernández Sampieri, R., & Fernández Collado, C. (2014). *Metodología de la investigación* (P. Baptista Lucio, Ed.; Sexta edición). McGraw-Hill Education.
- [6] Pereyra, L. E. (2020). *Metodología de la investigación*. Klik.
- [7] Yigit, C. O. (2016). Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(1), 360-383. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.917724>
- [8] Katsigianni, G., Loyer, S., & Perosanz, F. (2019). PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS. *Remote Sensing*, 11(21), 2477. <https://doi.org/10.3390/rs11212477>
- [9] Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>
- [10] Vazquez-Ontiveros, J. R., Becerra, G. E. V., & J. Ramon Gaxiola-Camacho. (2019). Implementación de la técnica PPP-GNSS para el monitoreo de la salud estructural en puentes. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33003.49446>
- [11] Vazquez-Ontiveros, J. R., Vazquez-Becerra, G. E., Quintana, J. A., Carrion, F. J., Guzman-Acevedo, G. M., & Gaxiola-Camacho, J. R. (2021). Implementation of PPP-GNSS measurement technology in the probabilistic SHM of bridge structures. *Measurement*, 173, 108677. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108677>
- [12] Banville, S., Hassen, E., Lamothe, P., Farinaccio, J., Donahue, B., Mireault, Y., Goudarzi, M. A., Collins, P., Ghoddousi-Fard, R., & Kamali, O. (2021). Enabling ambiguity resolution in CSRS-PPP. *NAVIGATION*, 68(2), 433-451. <https://doi.org/10.1002/navi.423>
- [13] Nowak, A. S., & Collins, K. R. (2012). *Reliability of Structures*, Second Edition. CRC Press.
- [14] American Association of State Highway and Transportation Officials (Ed.). (2020). *LRFD bridge design specifications* (9th edition). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [15] Pipinato, A. (Ed.). (2022). *Innovative bridge design handbook: Construction, rehabilitation and maintenance* (Second edition). Butterworth-Heinemann, is an imprint of Elsevier.
- [16] Vazquez-Ontiveros, J. R., Martinez-Felix, C. A., Vazquez-Becerra, G. E., Gaxiola-Camacho, J. R., Melgarejo-Morales, A., & Padilla-Velazco, J. (2022). Monitoring of local deformations and reservoir water level for a gravity type dam based on GPS observations. *Advances in Space Research*, 69(1), 319-330. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.018>
- [17] Spencer, C. J., Yakymchuk, C., & Ghaznavi, M. (2017). Visualising data distributions with kernel density estimation and reduced chi-squared statistic. *Geoscience Frontiers*, 8(6), 1247-1252. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.05.002>