

Development and Comparison of a Vision System for Hook Inspection on Cranes

Luis Alberto Tovar-Ortiz , Miguel Hernández-Bolaños , Juan Carlos Herrera-Lozada , Israel Rivera-Zárate , Mauricio Olguín-Carbajal , and Jacobo Sandoval-Gutiérrez 

Abstract—Overhead cranes are industrial machines that can cause user accidents due to deficiencies in inspecting their various components. One of the activities consists of verifying that the load hook does not exceed the limit deformation. However, the lack of historical records and negligence in visual inspection is a problem to ensure a correct maintenance service. Therefore, the objective of the research was to develop a vision system capable of inspecting, recording, and verifying the hook parameters. The method involved designing a vision module on an integral crane scanner system. A five-state deformation experiment of a cargo hook was modeled with ANSYS and fabricated in 3D printing to validate the proposed module by measuring the parameters manually with a commercial and proprietary vision system. The comparison between the two systems was satisfactory in detecting the latch and the correct position. Finally, the proprietary system improved the resolution up to 0.0435 mm on the hook deformation. With the system's contribution, it will be possible to know the valuable and safe life of the crane hook by automatic constant inspection.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/8874>

Index Terms—Computer vision, Crane safety, Hook inspection.

I. INTRODUCCIÓN

El gancho de carga es el elemento final de la grúa viajera que permite mover objetos dentro de un área de procesos. Para asegurar la condición mínima de operación del gancho es necesario aprobar las inspecciones normalizadas. La temporalidad de las inspecciones son al inicio de cada turno y en periodos predeterminados de acuerdo con las normas ASME [1], [2], OSHA [3] o CMAA [4]. Una forma de realizar la inspección es de carácter visual y con el criterio del inspector se determinan los defectos físicos [5]. Un gancho es inspeccionado periódicamente para determinar la deformación, corrosión, marcas del fabricante, para verificar dimensiones, desgaste y presencia del seguro [6]. Las fallas comunes en un gancho de carga se deben a la fatiga, es decir los cambios en la microestructura por la carga y descarga continua, las causas se atribuyen al esfuerzo de flexión combinado, por tensión, debilitamiento por el desgaste, deformaciones plásticas por sobrecarga y exposición térmica excesiva [7].

L. A. Tovar-Ortiz, M. Hernández-Bolaños, J.C. Herrera-Lozada, I. Rivera Zárate, and M. Olguín-Carbajal are with the Instituto Politécnico Nacional, Mexico (e-mails: ltovaro2100@alumno.ipn.mx, mbolanos@ipn.mx, jlozada@ipn.mx, irivera@ipn.mx, and molguinc@ipn.mx).

J. S. Gutiérrez is with the Universidad Autónoma Metropolitana, Lerma, México (e-mail: j.sandoval@correo.ler.uam.mx).

Algunas prácticas alternativas a las inspecciones visuales son las pruebas no destructivas, de las cuales se ha documentado las pruebas por líquidos penetrantes [8] y ultrasónicas [9], estas dos metodologías pueden detectar grietas en el material y en el caso de la prueba ultrasónica, cualquier defecto interno. El estado del arte muestra un desarrollo limitado de las técnicas de inspección para el gancho de carga, por esta razón este trabajo desarrolló un método de inspección visual automatizado no destructivo y alternativo para ser utilizado en la industria. La investigación de inspección visual reportada para el gancho de carga es la detección de corrosión y desgaste realizado por Wei Li et al. [10] en donde se muestra la detección y reconocimiento del gancho de carga, se ocupa una máscara de la superficie del gancho para reconocer en él sus defectos y la interferencia de las texturas y colores del fondo. La técnica aplicada fue Mask R-CNN y detallada por Gkioxari et al. en [11].

A. Inspección Visual Automatizada

La inspección visual automatizada es una aplicación específica de la visión artificial que emplea cámaras y software especializado para capturar y procesar imágenes de un tamaño de resolución en función de los componentes a inspeccionar. El software analiza, identifica y da un resultado automático para determinar si hay defectos, desgaste y daños con base en un patrón, tal como se muestra en la Fig. 1.

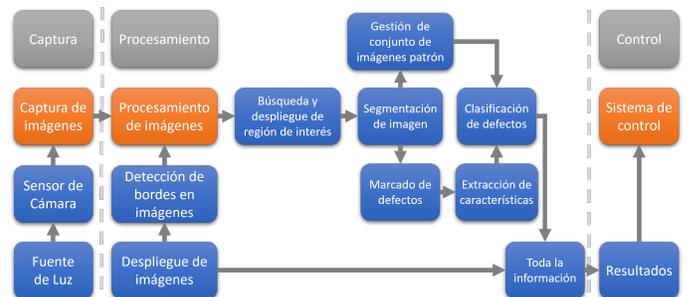


Fig. 1. Inspección visual automatizada.

Para poder identificar o reconocer el porcentaje de similitud de los objetos se retomó el proceso en cuatro etapas: sentido, preprocesamiento, extracción de características y clasificación. Las tres principales categorías de clasificación de objetos son coincidencia de prototipos, clasificación basada en formulación estadística óptima y clasificación basada en redes neuronales. Las sugerencias dan énfasis en las características

del objeto para conseguir un proceso de clasificación sencillo, rápido y eficiente [12].

El clasificador kNN (k-nearest neighbours, o k-vecinos más cercanos, a veces llamado también de distancia mínima) trabaja con la medición de la distancia entre el objeto a clasificar y cada una de las referencias o prototipos almacenados de las clases. La precisión del clasificador dependerá del número de referencias k o de mediciones hacia sus vecinos cercanos, la clase se asigna con base en el mayor número de coincidencias.

La rapidez de respuesta del clasificador es menor cuando hay un mayor número de referencias y clases. La facilidad de implementación del clasificador se debe a que su entrenamiento solo consiste en almacenar las referencias, siempre y cuando los elementos a clasificar sean similares. Este clasificador tiene una resiliencia a los datos con ruido [13].

Al clasificador se le agregó una herramienta auxiliar conocida como marcador fiducial para tener la posibilidad de personalizar la biblioteca. La función principal de este marcador es dar un punto de referencia mediante cuadros o círculos monocromáticos. Además de permitir tener una dimensión de referencia para definir las dimensiones reales de los objetos en la imagen. La tecnología inició con aplicaciones de realidad aumentada y posteriormente se emplearon en la robótica [14].

1) *Visión comercial*: Los sistemas de visión comercial han sido desarrollados para aplicaciones industriales. En específico, los modelos de sensor visión son versátiles por integrar todo en uno, es decir, cámara, luz y controlador. Las características descritas por el fabricante Keyence sobre modelo IV-500CA [15] apoyan para que el usuario final no requiera conocer algún lenguaje de programación o entrenamiento sofisticado para resolver un problema.

B. Criterios para Inspección de Ganchos

De acuerdo con la norma ASME B30.10 en la sección de Hooks [1], existen trece criterios para retirar un gancho del servicio.

- 1) Falta o es ilegible para identificar al fabricante.
- 2) Falta o es ilegible para identificar la capacidad de carga.
- 3) Hay corrosión o picaduras en exceso.
- 4) Se muestran raspones, grietas o hendiduras.
- 5) Hay un desgaste que excede un 10% de la dimensión inicial del gancho.
- 6) Hay un doblez, deformación o torcedura con relación al plano del gancho inicial.
- 7) Hay una apertura en la garganta del 5% y que no excede $\frac{1}{4}$ de pulgada.
- 8) El auto bloqueante no permite cerrar el gancho adecuadamente.
- 9) Daño en el seguro que no pueda operar de forma adecuada.
- 10) Accesorios incompletos o dañados que evitan el funcionamiento adecuado.
- 11) La presencia de corrosión en las roscas, desgaste o daño.
- 12) Rastro de una sobrecalentamiento o de una soldadura sin certificación.
- 13) Alteración a la certificación, mediante desbaste o cualquier otra modificación.

Con relación a los criterios de inspección se muestra en la Fig. 2 las partes de un gancho de carga.

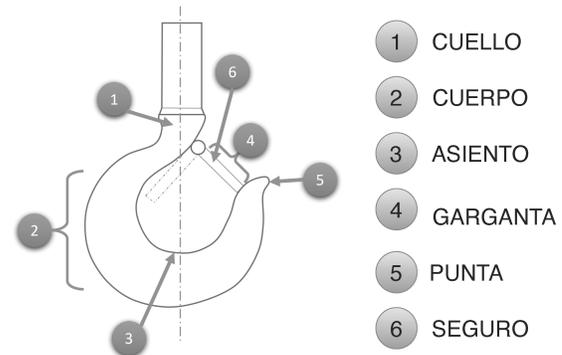


Fig. 2. Partes de un gancho: 1) Cuello, 2) Cuerpo, 3) Asiento, 4) Garganta, 5) Punta, 6) Seguro.

Otro motivo que refuerza la importancia de realizar la presente investigación es la necesidad presentada en el área de servicio la empresa Nekotec Manufactura S. A. de C. V. [16]. A partir de la experiencia y necesidades de sus clientes, se han encontrado áreas de oportunidad en la inspección. Particularmente, incorporar una tecnología para prevenir accidentes al cumplir las normas de inspección en las grúas.

C. Aportaciones

La propuesta de inspección del gancho de carga tiene diversas ventajas que son desglosadas a continuación:

- La inspección propuesta parte de un diseño integral de servicio modular, habilitado para funcionar dentro de un escáner total de la grúa.
- Se utiliza la posición del inicio de turno para realizar la inspección, aprovechando las mismas condiciones para cada lectura, aumentando la precisión entre mediciones.
- El sistema fue validado y comparado con una plataforma comercial de sensor visión.
- La precisión del sistema logra detectar la posición correcta del seguro y el límite permitido de la apertura de la garganta del gancho de carga.
- El sistema permite registrar las medidas en un archivo histórico que sirve de respaldo para mantenimientos, auditorías o peritajes en caso de alguna situación imprevista al usuario y al fabricante.
- Adicionalmente, el operario de la grúa tendrá una herramienta auxiliar que le permitirá cumplir sus tareas de trabajo sin emplear tiempo extra.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La arquitectura propuesta forma parte de un escáner de grúa ideal, el cual, cuenta con cinco tareas, control de grúa, almacenamiento con envío de información, interfaz de usuario, adquisición de los datos de sensores y los módulos de inspección, tal como se muestra en la Fig. 3

De modo particular, el módulo de inspección por visión del gancho se muestra en la Fig. 4, comparte los recursos de la arquitectura, particularmente, la adquisición de la imagen

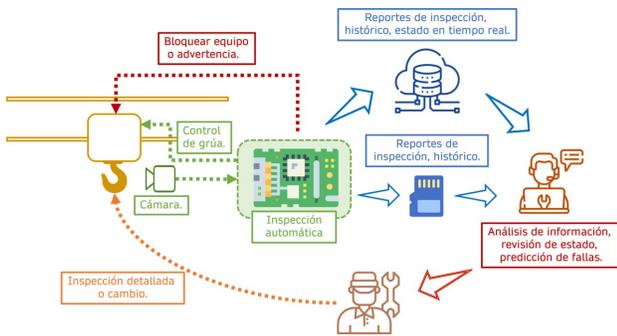


Fig. 3. Diagrama de la inspección automática.

por una cámara, la unidad de procesamiento, la interfaz de comunicación hacia los usuarios y a la grúa, la unidad de almacenamiento interno y la base de datos externa.

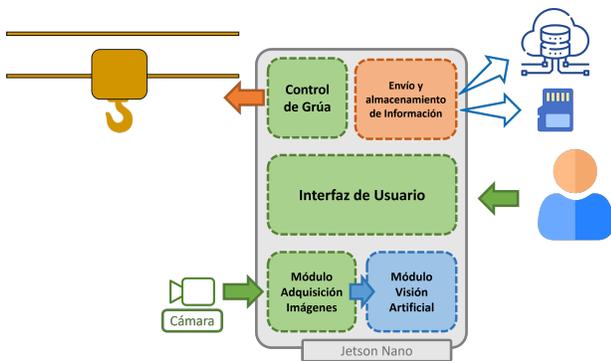


Fig. 4. Partes del módulo de inspección por visión.

A. Módulo de Inspección por Visión

Con base en los criterios de la norma ASME B30.10 [1] se realizó un análisis para probar experimentalmente el módulo de inspección. La consideración es visual y desde la perspectiva del inspector humano. Para ello, el módulo de inspección propuesto se enfocó en resolver parcialmente los criterios 3-5, 8-9 y 12-13, mientras tanto, se buscó implementar totalmente 6 y 7. Los dispositivos empleados para la construcción del módulo de inspección por visión fueron los siguientes:

La unidad de procesamiento utilizada fue la plataforma Jetson Nano dada las ventajas reportadas [17] y adicionalmente por lo asequible. Su puerto de entradas y salidas de propósito general (GPIO) para conectar sensores, actuadores e interfaces de comunicación serial [18] y la capacidad de almacenamiento de tarjetas de microSD.

La interfaz serial de cámara (SCI) es compatible con la unidad de procesamiento modelo IMX219-77 marca Wave-share, donde destaca la propiedad ideal de 8 mega píxeles para las aplicaciones de reconocimiento de rostro o placas de vehículo [19]. La interfaz de comunicación con los usuarios se realizó mediante el protocolo de comunicación Transporte de telemetría de colas de mensaje (MQTT), un monitor para la visualización y un teclado de operación. El almacenamiento interno utilizó una tarjeta de memoria SDcard y para el almacenamiento externo a la plataforma comercial de servicio ThingSpeak.

El algoritmo de aprendizaje automático con la clasificación kNN fue desarrollado para detectar el porcentaje de coincidencia del perfil, para buscar deformaciones, desgaste y verificar el seguro del gancho. Con el apoyo de la biblioteca para Visión por computadora de código abierto (OpenCV) en lenguaje Python se utilizó para medir el ancho de gancho, en donde fue el indicador de la abertura de garganta. Así mismo, dos tipos de lenguajes fueron comparados, Java y Python. La diferencia sustantiva para Python es la biblioteca OpenCV. El marcador fiducial utilizado fue Augmented Reality University of Cordoba (ARUco) para la etiqueta y paquete de herramientas para Realidad Aumentada (ARTag y ARToolkit), codificado en una matriz cuadrada de tamaño predeterminado.

Dos clases de referencia son almacenadas como válida y no válida, para después comparar la imagen adquirida. Las diferencias en referencias darán las referencias del porcentaje de las deformaciones o desgastes.

Para obtener el perfil del gancho y su seguro, el procesamiento de la imagen adquirida realiza una conversión a escala de grises, aplicación del filtro de mediana, obscurecer, aplicar brillo, aplicar filtro de dilatación y después se pueden repetir los procesos hasta alcanzar la calibración del patrón. Una vez realizada la configuración se acciona la inspección por medio de un botón en la interfaz.

B. Diseño y Construcción de Grúa Escala

El prototipo de grúa a escala se diseñó y construyó para implementar los movimientos básicos de la grúa, llevar la posición del gancho a la posición inicial y mostrar la interfaz de usuario. La estructura fue ensamblada con perfiles de aluminio tipo Bosch®, 20mm x 20 mm, con la finalidad de ampliar o reducir las medidas para la sujeción de los mecanismos. El sistema motriz fue retomado de una grúa real, es decir, un puente con el par de ruedas motrices y de ruedas libres apoyadas sobre el perfil, y para garantizar la tracción del sistema se agregó una rueda en la parte inferior, este sistema se replicó en el carro transversal. Los actuadores fueron motores de CD con su caja reductora de velocidad. En la Fig. 5 se muestra la estructura y en la Fig. 6 los bloques de los mecanismos.

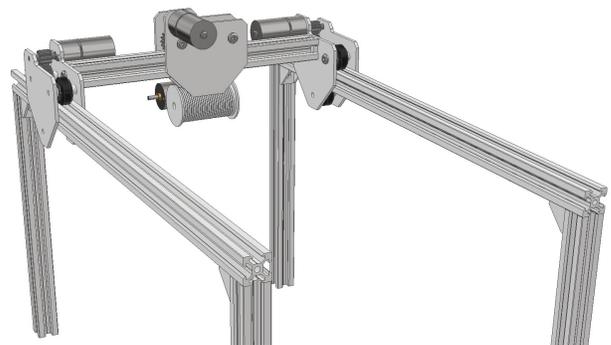


Fig. 5. Estructura de la grúa prototipo.

La estructura para la inspección del gancho se diseñó considerando los mismos materiales del prototipo de grúa y con la posibilidad de adaptar tanto el sistema de visión

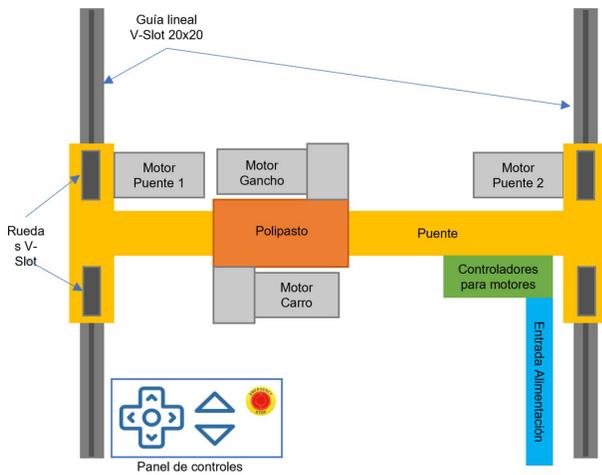


Fig. 6. Partes de la grúa prototipo.

comercial como el módulo de visión propuesto. En la Fig. 7 se muestra el diseño realizado.

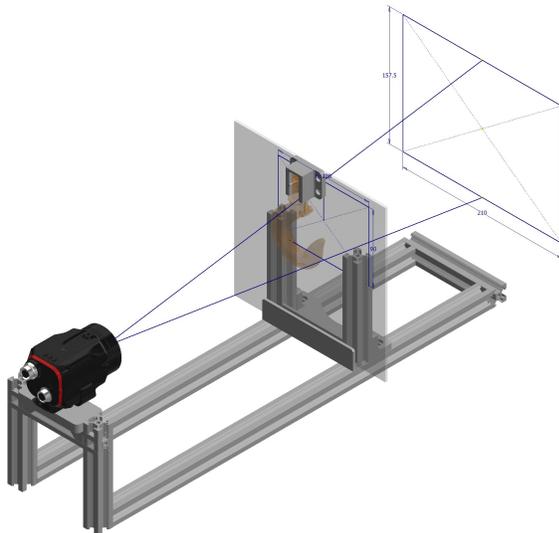


Fig. 7. Soporte de los sistemas de visión.

Para la etapa de potencia se trabajó con puentes H dobles L298N. La interfaz de la unidad de procesamiento con el sistema de operación se realizó a través de un joystick para mover los motores con regulación de la velocidad, como indicadores se propuso LEDs y una pantalla LCD para mostrar el sentido de activación de los motores y la velocidad de acuerdo con su intensidad. Dentro de la pantalla también se aprovechó para dar la información del resultado de la inspección del gancho.

Para determinar las posiciones se utilizaron los sensores de distancia VL53L0X. La interacción con el usuario empleó una tarjeta ESP32 con un menú de opciones, para mandar ejecutar el de proceso de inspección de gancho y verificar que el uso de la grúa cumple con su normatividad en el tiempo de operación, la cantidad de ciclos de trabajo, la capacidad de carga u otras variables. El registro de la información almacena el tiempo de funcionamiento del equipo y los resultados de

las inspecciones. Para la información vía remota se empleó la plataforma ThingSpeak y con ayuda de Node-Red se logró una comunicación a través del protocolo MQTT con el prototipo de grúa.

III. DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

Para los experimentos se tuvieron los requisitos de una posición inicial del gancho al inicio de turno y la hoja de datos del gancho.

A. Experimento 1. Presencia y Detección de Seguro

En la inspección del gancho de carga para el criterio 8 y 9 de la ASME 30.10, una grúa viajera debe tener su seguro en la posición correcta, y el perfil correcto sin modificaciones de las dimensiones. El fallo de la inspección significará que el seguro no está en la posición correcta, es decir, el resorte no sirve y no retornará a su posición original, o le falta el seguro. La revisión manual de este criterio lo realiza en forma visual el inspector, es una tarea cotidiana que no requiere una capacitación o actualización. El sensor de visión comercial utilizó las herramientas de presencia, color, forma, ancho y orientación.

B. Experimento 2. Abertura de Garganta

Los ciclos continuos de carga en el tiempo van a deformar el gancho de carga, de aquí se comprobó que no se exceda la deformación máxima permisible, el criterio 6 y 7 de ASME 30.10 en donde se menciona un límite para la abertura de la garganta para del 5%. El experimento consistió en el diseño y fabricación 3D en plástico PLA (Poliácido Láctico) de un conjunto de ganchos de carga con deformaciones. Por medio de un análisis de elemento finito con el software ANSYS se logró determinar las deformaciones del gancho, dadas varias cargas, hasta encontrar la carga que genera una apertura de garganta cercana al 5%. El gancho patrón fue un SE GR8 de la marca Green Pin HKK03A010 que soporta 1.25 t (tonelada métrica). Los cinco ganchos fabricados fueron generados con diferentes cargas aplicadas, obteniéndose la correspondiente dimensión de la garganta, deformación total y el esfuerzo. El caso 0 representa el gancho a su carga nominal del 100%, el caso 1 se aplicó la carga de una prueba de certificación de la grúa en 125% de la carga nominal, en el caso 2 fue aplicada la carga máxima de 5 t como ampara el fabricante en su límite de seguridad, es decir cuatro veces la carga nominal y que provocará un daño irreversible. Adicionalmente, se tomó una carga nominal del 200% en el caso 3 y finalmente, en el caso 4 una carga de 250% que resulta en una abertura de garganta cercana al 5% por arriba del valor original.

C. Experimentos 3-5. Inspección Manual, Sistema Comercial y Módulo Propuesto

Una vez finalizado el experimento 2, se propuso un servicio de revisión ciega por parte de un inspector de calidad, como si fuera una certificación inicial de grúa para cada tipo de gancho. Con los otros dos sistemas se replicó la misma inspección pero con el sistema comercial y el propuesto.

D. Experimento 6. Integración y Simulación de Grúa

Para verificar el funcionamiento de la inspección se integró el prototipo de grúa a escala, con la finalidad de simular las interacciones entre grúa y el escáner, las tareas mínimas requieren operar el control para mover el polipasto hacia la inspección, monitorear los resultados de la inspección y obtener los tiempos de operación de los motores.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados del Experimento 1

Se encontraron resultados similares para los dos sistemas de inspección automatizada en las diferentes posiciones para el seguro y gancho. Las pruebas y resultados del sistema propuesto fueron exitosos para el experimento y son consistentes con el sistema comercial reportado en [20]. La configuración de parámetros no puede ser comparada debido a la arquitectura cerrada del sistema comercial, en donde, la configuración es desconocida para el usuario. El sistema comercial opera con un software propietario y solo se pueden verificar los porcentajes de coincidencia.

El sistema propuesto con las herramientas de Java logró resultados satisfactorios para las resoluciones mínimas de 750 x 750 píxeles. La imagen de referencia con la escala de grises se dio con los valores de 0.3 red + 0.5 green + 0.2 blue, el filtro de mediana con un kernel de tamaño 11, la función potencia para dar oscuridad a la imagen, la función raíz cuadrada para dar brillo, el filtro de dilatación con un elemento de estructura circular de 3 píxeles de radio, seguido de las mismas funciones para oscuridad y brillo. El pseudocódigo 1 muestra el algoritmo de segmentación para JAVA.

Algoritmo 1 Procedimiento segmentation1()

Entrada: *img*

Salida: *vaiImg*

```

vaiImg ← vaiimages(img)
vaiImg ← vaiImg.greylevels(0.3, 0.5, 0.2)
vaiImg ← vaiImg.fmedian(11)
vaiImg ← vaiImg.pow(2.0)
vaiImg ← vaiImg.sqrt()
vaiImg ← vaiImg.dilation(circle(3))
vaiImg ← vaiImg.pow(2.0)
vaiImg ← vaiImg.sqrt()
vaiImg ← vaiImg.sqrt()
devolver vaiImg

```

Los resultados de diferentes casos se muestran en la Fig. 8 para el sistema de visión Keyence.

En el caso del sistema propuesto con JAVA las dimensiones de imágenes son de 750 x 750 píxeles, el valor dP es la distancia a la clase 1 (PASS) y dW es la distancia a clase 0 (WRONG). Es decir, se tienen dos clases, k=1 en cada clase para la comparación con el prototipo ideal. El pseudocódigo 2 muestra la implementación del algoritmo kNN.

En la Fig. 9a se muestra la prueba 1 con el seguro del gancho en su posición correcta y pasa la inspección con una imagen “válida” para dP = 359.8180 y “no válida” para dW = 374.5157, y por lo tanto, la inspección es más cercana a

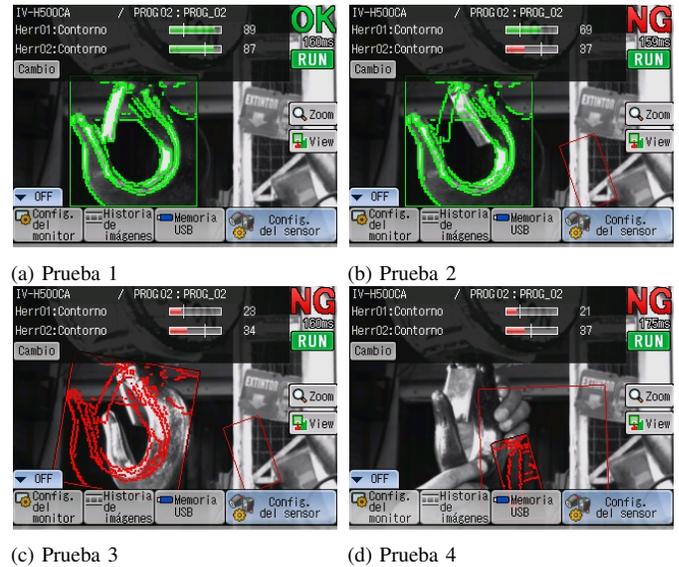


Fig. 8. Pruebas del seguro (a) Gancho y seguro no detectado. (b) Seguro no detectado. (c) Gancho y seguro no detectado. (d) Posición errónea del gancho.

Algoritmo 2 Procedimiento knn()

Entrada: *patternTest, patternPass, patternWrong*

Salida: *r*

```

r ← 2
s1 ← 0
s2 ← 0
para i ← 0, Test.height hacer
  para j ← 0, Test.width hacer
    s1 = s1 +
      pow((patternTest[i][j] - patternPass[i][j]), 2)
    s2 = s2 +
      pow((patternTest[i][j] - patternWrong[i][j]), 2)
  fin para
fin para
distPass = sqrt(s1)
distWrong = sqrt(s2)
imprimir distPass
imprimir distWrong
si distPass < distWrong entonces
  imprimir ' == OK == '
  r ← 1
si no
  imprimir ' == NG == '
  r ← 0
fin si
devolver r

```

la clase “válida” o “PASS”. Para la prueba 2 (Fig. 9b), el seguro se encuentra un poco abierto, por ello, no debe pasar la inspección dado el indicio de problemas con el resorte. La distancia a la referencia “válida” es de 377.7314 y la referencia “no válida” de 375.5556, es decir, la inspección no se aprueba porque es más cercana a la clase “no válida” o “WRONG”. Dos casos extras fueron la prueba 3 (Fig. 9c) con una desviación hacia la referencia “válida” de 385.9650 contra la distancia de 376.2393 a la referencia “no válida”. En la prueba 4 de la Fig. 9d, se tiene la distancia de 389.2249 a la referencia “válida” y más cercana a la referencia “no válida” de 363.8502.

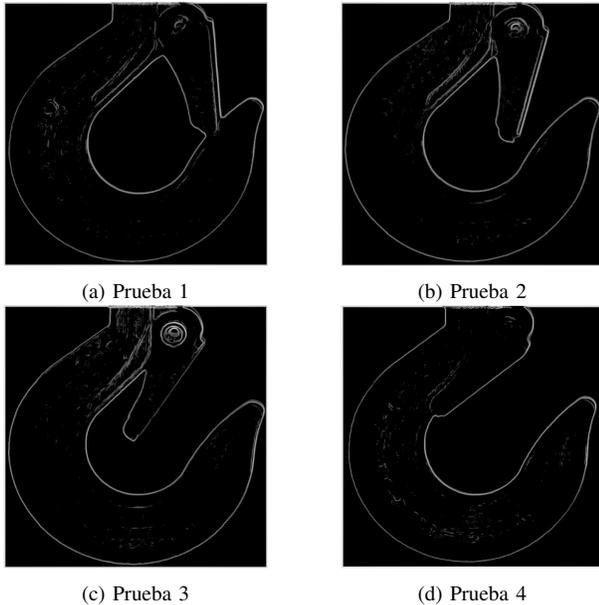


Fig. 9. Resultados para la extracción de perfil con JAVA.
 (a) $dP = 359.8180$, $dW = 374.5157$, PASS (Clase = 1).
 (b) $dP = 377.7314$, $dW = 375.5556$, WRONG (Clase = 0).
 (c) $dP = 385.9650$, $dW = 376.2393$, WRONG (Clase = 0).
 (d) $dP = 389.2249$, $dW = 363.8502$, WRONG (Clase = 0).

En las pruebas del módulo con Python, las funciones empleadas fueron `cvtColor()`, para convertir la imagen de referencia a escala de grises, la función `convertScaleAbs()` con un $h = 2.0$ para incrementar el brillo de la imagen, `adaptiveThreshold()` para binarizar la imagen e ignorar las regiones con diferente iluminación y la función `morphologyEx()` para aplicar el filtro morfológico de cerradura que se repitió 6 veces, para eliminar las regiones de ruido dentro de la superficie y obtener el sólido que represente el cuerpo completo del gancho. Tal como se muestra en el Algoritmo 3.

En la Fig. 10 se muestran los resultados para cuatro pruebas, para la imagen de prueba 1 (Fig. 10a) la distancia a la referencia “válida” de 34821.2747 unidades y la distancia hacia la referencia “no válida” de 54138.1275 unidades, el resultado fue una clasificación como “válida” u “== OK ==”, y dado que el seguro estaba en la posición correcta esto es un resultado óptimo. Para las imágenes de prueba 2, 3 y 4 (Figuras 10b, 10c y 10d), la distancia a la referencia “no válida” fue la menor, y por tanto un resultado de la clasificación como “== NG ==”.

Algoritmo 3 Procedimiento segmentation2().

Entrada: *img*

Salida: *closing*

```
gray ← cv.cvtColor(img, cv.COLOR_BGR2GRAY)
auto ← auto_brightness_and_contrast_gray(gray)
adjusted ← cv.convertScaleAbs(gray, alpha = 2,
                               beta = 0)
thres ← cv.adaptiveThreshold(adjusted, 255,
                             cv.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C,
                             cv.THRESH_BINARY_INV, 127, 2)
k1 ← cv.getStructuringElement(cv.MORPH_RECT,
                              (3, 3))
closing ← cv.morphologyEx(thres, cv.MORPH_CLOSE,
                          k1, iterations = 3)
```

devolver *closing*

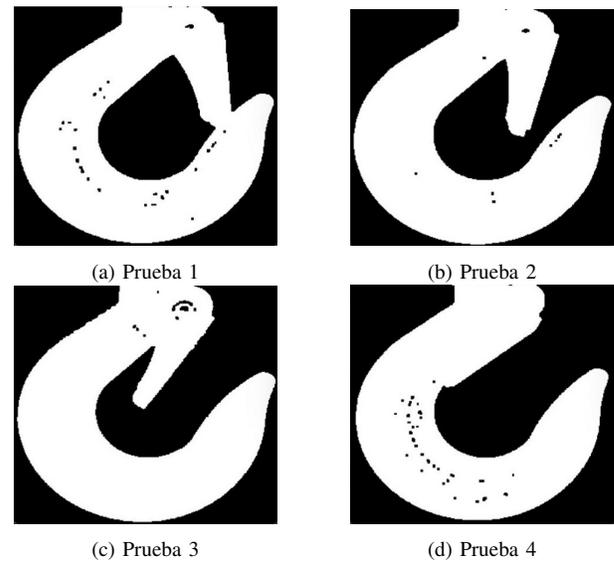


Fig. 10. Resultados para la extracción de perfil con Python.
 (a) $dP = 34821.2747$, $dW = 54138.1275$, Clasificación: OK.
 (b) $dP = 52006.8733$, $dW = 51716.6153$, Clasificación: NG.
 (c) $dP = 55888.0656$, $dW = 44450.5304$, Clasificación: NG.
 (d) $dP = 61252.0404$, $dW = 39924.4014$, Clasificación: NG.

B. Resultados del Experimento 2

Un gancho original HKK03A010 tiene 24.50 mm en la abertura de garganta, posteriormente con ayuda de la simulación en ANSYS se obtuvo la desviación para rangos próximos al 5% arriba del valor nominal equivalente a 25.725 mm. Los ganchos simulados L0 y L1 se encuentran dentro de la tolerancia permitida por la norma, mientras los ganchos L2 y L4 están fuera de norma, y no deberían ser aprobados por ningún tipo de inspección porque no están dentro del rango válido. En la Fig. 11 se muestran las condiciones de la simulación para el soporte fijo (Fig. 11a), la fuerza aplicada (Fig. 11b) y los resultados particulares de la deformación total para el caso L2 (Fig. 11c).

En la Tabla I se muestran los resultados de la simulación que permitieron fabricar los ganchos en 3D y particularmente los valores en negritas son para identificar las dimensiones no aceptables por el diámetro de la garganta.

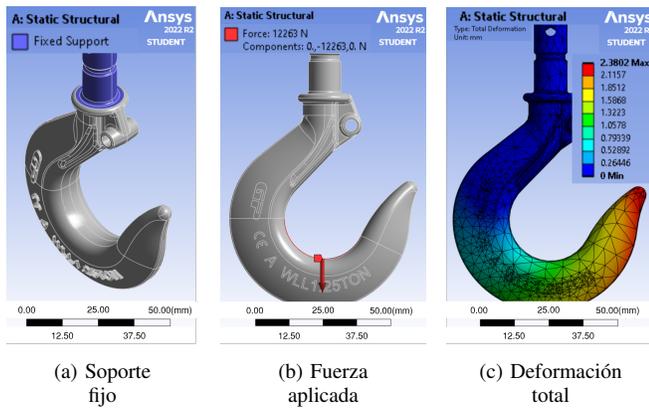


Fig. 11. Simulación de carga en ANSYS. (a) En azul se observa la condición de fijación del gancho. (b) La flecha roja indica la fuerza aplicada. (c) Los colores muestran el resultado del análisis del elemento finito, la mayor deformación es roja y la menor azul.

TABLA I
PARÁMETROS DE LAS SIMULACIONES DEL GANCHO

Número de caso	Carga aplicada (t)	Abertura de garganta (mm)	Deformación total (mm)	Esfuerzo (MPa)
Original	0.0000 (0%)	24.50	0.0000	000.00
L0	1.2500 (100%)	25.02	0.5950	0623.57
L1	1.5625 (125%)	25.26	0.7438	0779.46
L2	5.0000 (400%)	26.58	2.3802	2494.30
L3	2.5000 (200%)	25.54	1.1901	1247.10
L4	3.1250 (250%)	25.80	1.4876	1558.90

En la Fig. 12 se muestran las cotas resultantes de todos los casos propuestos, apertura de garganta, ancho del gancho y del asiento. Existe una relación proporcional entre los cambios en las dimensiones de la garganta y el ancho del gancho que fueron útiles para distinguir las deformaciones, sin embargo, las medidas sobre el ancho del asiento no fueron útiles para determinar cambios. Por ejemplo, entre los caso de L0 y L1 (Figs. 12b y 12c) hay un cambio de dimensión en la apertura de garganta de 0.24 mm, ancho del gancho con 0.04 mm y 0.00 mm para el ancho del asiento.

C. Resultados del Experimento 3

Con el apoyo del inspector de campo se realizaron las mediciones manuales, la técnica consistió en la medición del ancho del gancho con un Vernier de resolución de 0.1 mm para determinar la proporción de la apertura del gancho. Para obtener precisión en la medición se sugirió montar el gancho sobre una prensa, tal como se muestra en la Fig. 13. Las mediciones difieren del valor esperado para los casos del gancho original con L0 (Figuras 13a y 13b), y entre L1, L3 y L4 (Figuras 13c, 13e y 13f) con un valor de 0.1 mm. La medición de L2 contra L4 (Figuras 13d y 13f) obtuvo la diferencia esperada de 0.4 mm. Las diferencia de medida para el ancho del gancho L0 con L2 fue de 0.9 mm equivalente al 1.3%, lo que representa un 0.375% más de lo obtenido en la simulación.

D. Resultados del Experimento 4

Los resultados de las mediciones para cada caso con el sistema comercial Keyence se muestran en la Fig. 14. La

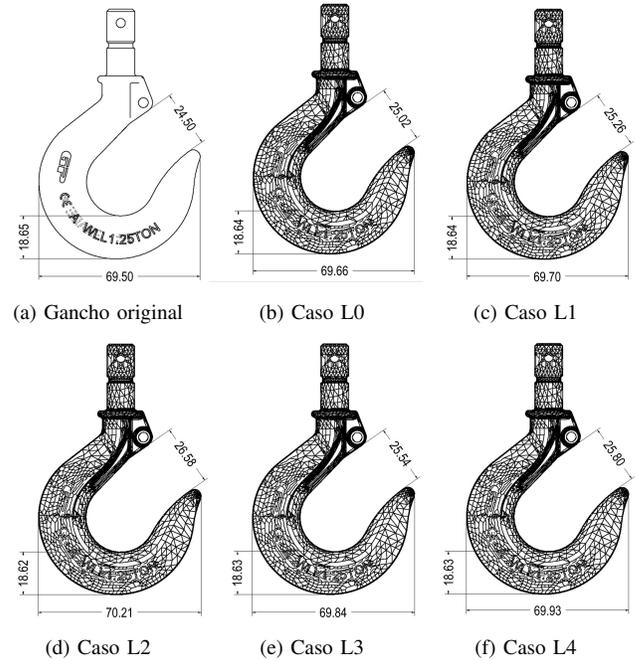


Fig. 12. Deformaciones en mm de la apertura de garganta (cota superior), ancho de gancho (cota inferior) y asiento (cota lateral). (a) 24.50, 69.50 y 18.65. (b) 25.02, 69.66 y 18.64 (c) 25.26, 69.70 y 18.64. (d) 26.58, 70.21 y 18.62. (e) 25.54, 69.84 y 18.63. (f) 25.80, 69.93 y 18.63.

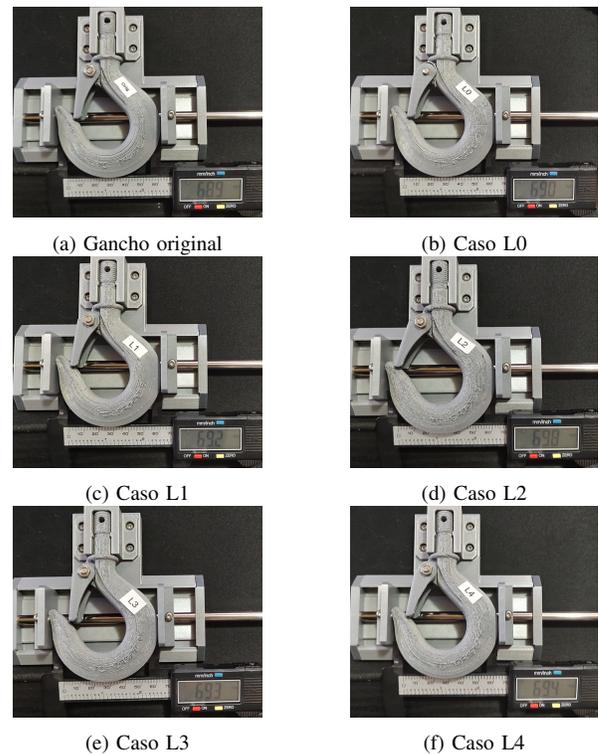


Fig. 13. Mediciones manuales en mm del ancho de gancho. (a) 68.90, (b) 69.00. (c) 69.20 y (e) 69.30 son rangos aceptables. (d) 69.80 y (f) 69.40 están fuera del rango.

respuesta de salida para este sistema esta dado por porcentajes de coincidencia del contorno que van de 0 al 100%. En la Fig. 14a el gancho original obtuvo una coincidencia del 100% por ser el patrón a comparar. En la Fig. 14b se muestra que una medición del caso L0 obtuvo el mismo porcentaje de coincidencia que el original. El caso L1 (Fig. 14c) en una medición se aproxima en un 99% al original. El caso L2 y L4 (Figs. 14d y 14f) disminuye en 79% y 81% respectivamente en la coincidencia con el original. Finalmente, el caso L3 (Fig. 14e) obtuvo un porcentaje de 87% del original. El sistema se configuró con un valor promedio igual o mayor al 87% como límite para ser aprobado.

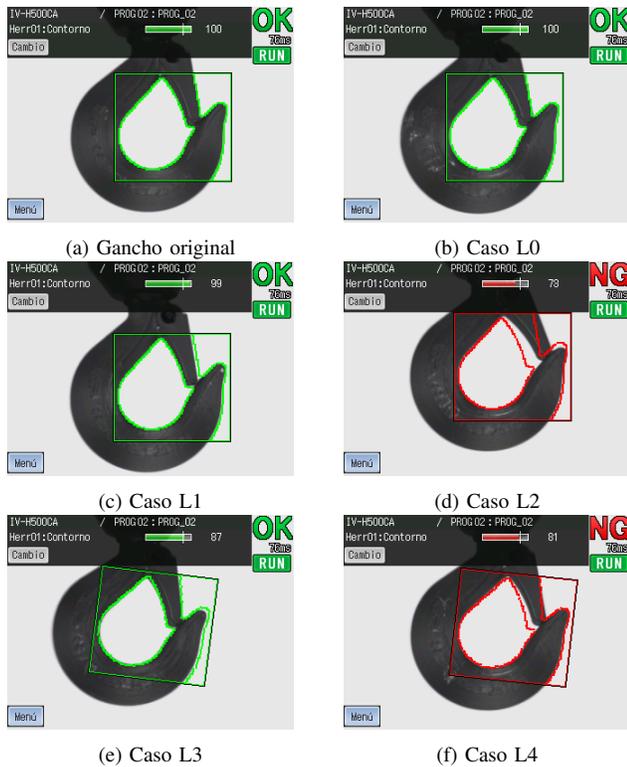


Fig. 14. Porcentajes de coincidencias del contorno y las aprobaciones si es $\geq 87\%$ con el software comercial Keyence. (a) y (b) 100%, (c) 99% y (e) 87% OK. (d) 78% y (f) 81% NG.

En la Fig. 15 se pueden observar los diagramas de cajas con los porcentajes de coincidencia del contorno para todos los casos con 20 repeticiones de lectura.

E. Resultados del Experimento 5

Para estas mediciones se empleó Python con los marcadores fiduciales, un ArUco de 2 cm en la esquina inferior nos permitió corregir la perspectiva y el obtener el factor de conversión de píxeles a milímetros. El programa fue capaz de medir el ancho del gancho en cerca de 1600 píxeles, tal como se muestra en la Fig. 16, lo que equivale a 69.66 mm y cada píxel tendría una resolución de .0435 mm, siendo menor a la resolución requerida de 0.25 mm, un aproximado de 5 veces menor.

Los resultados con el sistema propuesto fueron consistentes, repitiendo las 20 mediciones por cada tipo de gancho. El valor

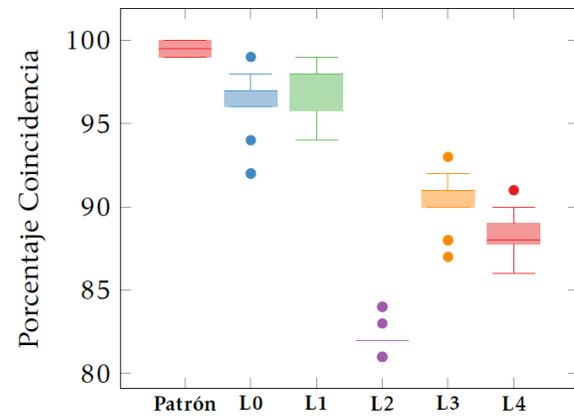


Fig. 15. Diagramas de las mediciones con el sistema Keyence.



Fig. 16. Mediciones con marcadores.

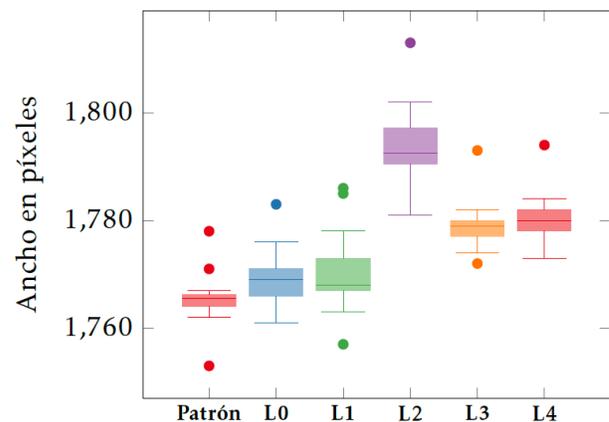


Fig. 17. Diagramas de las mediciones con el sistema propuesto.

promedio del gancho original se encontraba alrededor de los 1765 píxeles, mientras el gancho L2 mostraba en la medición un promedio de 1790 píxeles, en porcentaje sería 1.4%. Este valor obtenido por el sistema es muy similar al porcentaje de 1.3% obtenido por el sistema manual. Para el caso L4 la respuesta también es satisfactoria al estar fuera del umbral no válido. La mejora en la resolución se puede demostrar por la definición de los diagramas de la caja mostrados en la Fig. 17 e igualmente que en el sistema comercial, el usuario ayudaría en seleccionar el umbral de rechazo de la inspección.

F. Discusión de los Resultados

En el experimento 1, se logró detectar el seguro con los sistemas de visión para replicar la inspección visual del usuario. Para el sistema propuesto se logró implementar el algoritmo kNN con los lenguajes JAVA y Python.

En el experimento 2, la dificultad de llevar un gancho real a una deformación particular fue resuelta con la simulación y la impresión en 3D, la desventaja de la fabricación para la inspección visual fueron las líneas de impresión que generan bordes adicionales y pueden evitar la detección de texturas, grietas, raspones o calentamientos. En la simulación se logró comprobar que las deformaciones entre el ancho del gancho y la abertura de garganta varían proporcionalmente, y no fue el caso para el ancho de asiento.

En el experimento 3, se corroboraron manualmente las dimensiones de las muestras fabricadas. La precisión de la medición se le atribuye a la habilidad del usuario y la resolución de su instrumento.

En el experimento 4, se utilizó el sistema comercial con la herramienta de contorno, en donde se demostró que los porcentajes de coincidencia de contorno difieren consistentemente con la deformación de las muestras. Para esta solución, el usuario requiere capacitación mínima y tiene una configuración limitada.

En el experimento 5, el sistema propuesto logró clasificar las muestras de manera correcta y además, mejoró la funcionalidad dada por los sistemas manual y comercial. La mejora se debió al agregar la medición del ancho del gancho como medición indirecta de la abertura de garganta. El sistema puede ser ampliado en la configuración de sus herramientas para otro tipo de inspecciones y personalizar a la aplicación específica del usuario.

Los valores atípicos para los experimentos 4 y 5 representan un intervalo de estabilización de las condiciones ambientales cuando el sistema inicializa, se satura o presenta ruido. Se dejaron estas mediciones para corroborar la robustez del sistema a pesar de las perturbaciones típicas de la medición con una tendencia homogénea.

Los resultados contribuyen al problema de la inspección de gancho de manera cuantitativa al cumplir con lo estipulado en la norma. La detección del seguro y la deformación de la abertura de garganta no se habían reportado con anterioridad, la investigación similar en [10] menciona la inspección de gancho para defectos cualitativos en corrosión y abrasión. Es decir, el método considera la calidad de la superficie con el algoritmo K-Means++ y la segmentación de las características de color HSV.

V. CONCLUSIONES

Se logró probar con éxito la deformación límite del 5% en los ganchos industriales mediante la simulación de cargas del Análisis de Elemento Finito. Particularmente, los criterios 6-7 de ASME B30.10.

Se lograron inspeccionar parte de los criterios de la norma en el gancho de una grúa, por métodos diferentes, manual y dos sistemas automatizados por visión. Los sistemas de visión fueron capaces de detectar y clasificar el gancho con

su seguro en la posición correcta con un 100% de efectividad. Se logró inspeccionar correctamente la deformación en la abertura de la garganta o ancho del gancho en intervalos del 25% de carga nominal con tres diferentes técnicas: Vernier, algoritmo comercial de la marca Keyence y algoritmo propio. Con respecto a la comparación entre los sistemas de visión, el sistema comercial ofrece una salida de coincidencia en porcentaje absoluto al patrón, en tanto, el sistema propuesto resultó en una precisión de 0.04 mm suficiente para registrar el 5% de deformación límite para el tipo de gancho industrial más pequeño del mercado que exige una precisión de 0.25 mm. El algoritmo clasificador kNN resultó ideal para resolver la aplicación de inspección considerando ajustes personalizados. Sin embargo, el sistema no se limita para detectar los otros criterios de la norma del gancho o programar otros algoritmos de clasificación en el sistema.

Con relación a los costos de menor a mayor, la inspección manual forma parte de la actividad del operario y no debería representar una inversión adicional, el sistema desarrollado cuesta alrededor de US\$350 y el sistema comercial US\$1500.

El módulo de visión propuesto no sólo fue pensado de manera aislada, se diseñó para integrarse en una arquitectura denominada “Escáner de Grúa”, la prueba de concepto fue satisfactoria en un prototipo de grúa a escala y reciente en las tecnologías de grúas. La arquitectura y el módulo de visión permiten mostrar datos útiles para el diagnóstico y prevención de los futuros mantenimientos, crear el historial de inspecciones, integrarse con otros dispositivos o dar una funcionalidad como el bloqueo de la grúa por seguridad. La ventaja de implementar este sistema automático en conjunto radica en que la mayoría de las veces las inspecciones diarias no son realizadas, debido al tiempo que conlleva, lo tedioso que resulta el documentarlas y adjuntar evidencias cuando se presenta algún conflicto. Esta solución ayudará a los proveedores de servicio de mantenimiento con un respaldo de la información que les pueda ayudar a determinar la velocidad de desgaste de los componentes, tener evidencias de que la grúa necesita servicio, si es operada correctamente, hacer recomendaciones de uso y mantenimiento con una base más sólida de evidencias.

Como trabajo futuro, existen tres líneas a saber, la integración del sistema en la operación real de una grúa, la implementación de otros algoritmos de visión y para inspeccionar los demás criterios de la norma para grúas ASME 30.

REFERENCES

- [1] American Society of Mechanical Engineers, *ASME B30.10-2019. Hooks, Safety Standard for Cableways, Cranes, Derricks, Hoists, Hooks, Jacks, and Slings*. ASME, 2019. ISBN: 9780791873236.
- [2] American Society of Mechanical Engineers, *ASME B30.2-2022. Overhead and Gantry Cranes (Top Running Bridge, Single or Multiple Girder, Top Running Trolley Hoist)*, 2022. ISBN: 9780791874981.
- [3] Occupational Safety and Health Administration, *1910.179 - Overhead and Gantry cranes*, 2021. URL: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.179>.
- [4] Crane Manufacturers Association of America, *CMAA Specification No 78 - 2020. Standards and Guidelines for Professional Services Performed On Overhead Traveling Cranes and Associated Hoisting Equipment*, 2020. URL: <https://og.mhi.org/downloads/industrygroups/cmaa/specifications/toc/78.pdf>.

- [5] Y. Torres, J. Gallardo, J. Domínguez, and F. J. E. “Brittle fracture of a crane hook,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, pp. 38–47, Jan. 2010. doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.11.011.
- [6] M. Zwawi, “Structure integrity and fracture prediction of PLA 3d-printed eye grab hooks with different cross sections,” *Procedia Structural Integrity*, vol. 37, pp. 1057–1064, 2022. doi: 10.1016/j.prostr.2022.02.045.
- [7] K. K. D. Prashant R Mali, “Study of stress analysis of crane hook- a review,” *International Journal for Scientific Research and Development*, ISSN: 2321-0613, vol. 3, no. 04, 2015. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:201106708>.
- [8] L. P. K. Mukinay, D. K. Mutombo, C. M. Kalonji, P. K. Ndomatezo, B. M. Kiesse, W. L. Lufumbwa, S. I. Tshimbela, J. M. Lunguya, O. S. Mihigo, and D. K. Ngalamulume, “Non-destructive testings of the lifting hook and heat exchanger circuits of the research reactor TRICO II by liquid penetrant and ultrasonics testing,” *Arab Journal of Nuclear Sciences and Applications*, vol. 56, pp. 140–148, Jan. 2023. doi: 10.21608/ajnsa.2023.173282.1677.
- [9] K. Kishore, V. S. Gujre, S. Choudhary, A. S. Gujre, M. Vishwakarma, T. Thirumurgan, M. Choudhury, M. Adhikary, and A. Kumar, “Failure analysis of a 24 t crane hook using multi-disciplinary approach,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 115, p. 104666, Sept. 2020. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104666.
- [10] W. Li, G. Liu, and Y. Wang, “Machine vision-based hook defect detection,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2435, p. 012002, Feb. 2023. doi: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2435/1/012002>.
- [11] K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, and R. Girshick, “Mask r-cnn,” in *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, pp. 2961–2969, 2017.
- [12] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*. Pearson, 2018.
- [13] P. C. Sen, M. Hajra, and M. Ghosh, “Supervised classification algorithms in machine learning: A survey and review,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 99–111, Springer Singapore, July 2019. doi: 10.1007/978-981-13-7403-6_11.
- [14] M. Kalaitzakis, B. Cain, S. Carroll, A. Ambrosi, C. Whitehead, and N. Vitzilaos, “Fiducial markers for pose estimation,” *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 101, Mar. 2021. doi: 10.1007/s10846-020-01307-9.
- [15] Keyence, *¿Que es un sensor? Sensor Basics. Comprensión de los principios y características fundamentales*, 2020. URL: <https://www.keyence.com.mx>.
- [16] Neko, “Nekotec manufactura | nosotros,” 2024. URL: <https://www.nekotec.mx/nosotros>.
- [17] Nvidia, “Kit para desarrolladores jetson nano de 2gb,” 2023. URL: <https://www.nvidia.com/es-la/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/education-projects/>.
- [18] A. Kurniawan, *IoT Projects with NVIDIA Jetson Nano*, ISBN: 978-1-4842-6451-5. Apress, Dec. 2020. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6452-2>.
- [19] H. Padmasiri, J. Shashirangana, D. Meedeniya, O. Rana, and C. Perera, “Automated license plate recognition for resource-constrained environments,” *Sensors*, vol. 22, no. 4, 2022. doi: 10.3390/s22041434.
- [20] L. A. Tovar-Ortiz, M. Hernández-Bolaños, and J. Sandoval-Gutiérrez, “Inspección de gancho de carga de una grúa viajera por medio de un sistema de visión artificial,” *Boletín UPIITA*, vol. 91, July 2022.



Tovar-Ortiz L.A. He is pursuing a Ph.D. program in Robotic and Mechatronic Systems Engineering at the Center for Innovation and Technological Development in Computing of the National Polytechnic Institute. His academic interest is in image processing for industrial inspection and maintenance information systems, particularly overhead cranes.



Hernández-Bolaños, M. He is a communications and electronic engineer who graduated from ESIME of Instituto Politécnico Nacional (IPN) México in 1997. He received his MSc degree from CIDETEC of IPN México in 2009. He works in CIDETEC of IPN México since 1998 as a teacher. His teaching portfolio includes computer architecture, parallel processing and programming using FPGA and GPUs. His research interests are medical computing systems, advanced computer architecture, deep learning and neural networks.



Herrera-Lozada, J.C. He has been a full-time professor at the Instituto Politécnico Nacional (IPN) since 1998. He received the Ph.D degree in Computer Science and M.Sc. degree in Computer Engineering from Centro de Investigación en Computación (CIC-IPN). He has authored several articles and speaker at national and international conferences. In addition, he has participated in different research projects and technological developments. Currently he is a member of the National System of Researchers in México. His research interests include design of reconfigurable logic devices, embedded systems, bio-inspired algorithms and evolutionary hardware.



Rivera Zárate, I. He is a communications and electronic engineer who graduated from ESIME of Instituto Politécnico Nacional (IPN) México in 1994. He received his MS degree from CIC of IPN México in 2001. He works in CIDETEC of IPN México since 1998 as a teacher. His teaching portfolio includes computer architecture, parallel processing and programming using FPGA and GPUs. His research interests are medical computing systems, advanced computer architecture, deep learning and neural networks.



Olgún-Carbajal, M. Graduated from Higher School of Mechanical and Electrical Engineering (ESIME) Culhuacan unit of the National Polytechnic Institute of Mexico as an engineer in communications and electronics in 1995. In 2001 he obtained the degree of Master in Computer Engineering with a specialty in Digital Systems. Graduated as Doctor of Computer Sciences at the Center for Computer Research (CIC) in 2011. He has served as a professor and full-time researcher at the Center for Technological Innovation and Development in Computing (CIDETEC) since 2005. He has published several articles related to Intelligent Computing, computer graphics, virtual reality, and electronic applications in mobile devices.



Sandoval-Gutiérrez, J. Graduated at the Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ES-IME) from Instituto Politécnico Nacional (IPN) in Mexico City, Engineer Industrial Robotics in 2004 and later as Master and Doctor of Advanced Technology at the Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) from IPN in 2006 and 2010 respectively. He is a research professor at the Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma, Estado de México. He has published several articles related to the field of robotics, as well as patents in the area of Engineering. He has directed and participated in various research and technological development projects and belongs to the National System of Researchers of México.