

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN MEDIANTE DISPOSITIVOS ÓPTICOS DE BAJO COSTO

Carlos Manuel Pérez Pino¹, Fidel Ernesto Hernández Montero²

¹LACETEL, Instituto de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones, La Habana, Cuba,

²CUJAE, Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”, CUJAE, La Habana, Cuba,

¹e-mail: carlosmanuel@lacetel.cu

²e-mail: fhernandez@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un sistema para la estimación de la velocidad de rotación a través de sensores ópticos de bajo costo, tales como cámaras o webcams y algoritmos de procesamiento digital de imágenes. El sistema presentado se basa en la adquisición de un video de la rotación del rotor a través de una cámara y su procesamiento en una computadora. Se utilizaron dos tipos de videos: el primero, muestra una simple marca hecha a la sección transversal del rotor y el segundo, la superficie lateral no homogénea del rotor. En el video realizado se utilizó una etapa de pre-procesamiento para mejorar las cualidades de las imágenes, una de cálculo del nivel de similitud entre la primera imagen y las siguientes así como el análisis espectral para determinar la frecuencia de rotación a partir de la Transformada de Fourier. El rendimiento y efectividad del sistema es comprobado mediante experimentos utilizando videos hechos en sistemas virtuales y reales donde se obtuvieron correctamente las frecuencias utilizadas. Se comprobó que en el trabajo de simulación la robustez del sistema ante diferentes tipos de ruidos dependió del patrón que presentó el rotor. Mientras para videos reales, mostró un desempeño correcto y preciso para altas velocidades de rotación, pero para bajas velocidades, se obtuvo errores relativos altos por coincidir el valor real con el orden de resolución del tacómetro.

PALABRAS CLAVES: Medición de la velocidad de rotación, procesamiento de imágenes, dispositivos de bajo costo.

ROTATIONAL SPEED MEASUREMENT THROUGH LOW-COST IMAGING DEVICE AND DIGITAL IMAGE PROCESSING

ABSTRACT

Rotation speed detection is a fundamental parameter for system monitoring, process control and fault diagnosis of rotating machinery. The objective of this work is to develop a system for estimating rotation speed through low-cost optical sensors, such as cameras or webcams, and digital image processing algorithms. The system presented is based on the acquisition of a video taken from the rotation of the rotor through a camera and its processing on a computer. Two types of videos were used: one showing a simple mark made to the rotor cross section and the other the inhomogeneous side surface of the rotor. In the video taken, a pre-processing stage was used to improve the qualities of the images, a stage to calculate the level of similarity between the first image and the following and the spectral analysis to determine the rotation frequency from Fourier's Transform. The performance and effectiveness of the system is verified through experiments using videos made in virtual and real systems where the frequencies used were correctly obtained. It was found that in the simulation work, the robustness of the system to different types of noise depended on the pattern presented by the rotor. While for real videos, it showed a correct and precise performance for high rotation speeds, but for low ones, high relative errors were obtained by coinciding the real value with the order of resolution of the tachometer.

INDEX TERMS: Rotation speed measurement, image processing, low-cost devices.

1. INTRODUCCIÓN

Las maquinarias rotatorias ocupan un papel fundamental en una amplia variedad de industrias, por ejemplo: la energética, manufacturera o alimentaria. Para su control y monitoreo, se hace necesaria la medición de la velocidad de estas, siendo este uno de los parámetros fundamentales de este tipo de maquinarias. Por tanto, es esencial disponer

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN MEDIANTE DISPOSITIVOS ÓPTICOS DE BAJO COSTO

de un sistema preciso, fiable y económico que permita detectar dicha velocidad. Para este propósito, la elección del sensor es un aspecto determinante para que la medición sea satisfactoria y precisa. Según los autores en [1], este tipo de sensores se puede clasificar por la forma de instalación en: de contacto y no contacto.

Los sensores de contacto, por ejemplo, los tacómetros, se instalan en la superficie del objeto a medir y a partir del movimiento del mismo se determina la velocidad de rotación. Los tacómetros de contacto tienen como deficiencia que presentan un rango estrecho de medición, pueden generar desgaste en la superficie y afectar las características dinámicas del rotor a largo plazo [2], [3]. Además, requieren de una instalación hábil para minimizar la excentricidad y la desalineación [1]. En recientes investigaciones los acelerómetros han sido combinados con técnicas de procesamiento de señales de vibración, basadas en análisis tiempo-frecuencia y análisis de órdenes, para estimar la velocidad de rotación[4].

Los sensores de no contacto han surgido para resolver las restricciones que presentan los de contacto. Entre sus beneficios esta su larga vida mecánica, alta tolerancia al movimiento axial, mediciones de alta confiabilidad y buena opción para soluciones que necesiten estar aisladas eléctricamente [1]. Estos han sido desarrollados basándose en principios magnéticos, eléctricos u ópticos; pero cada tecnología presenta limitaciones y no pueden usarse en todo tipo de ambientes industriales[3]. Los sensores magnéticos necesitan que existan un material ferromagnético en el rotor para operar y son susceptibles a la interferencia electromagnética [5], [6]. Los electrostáticos no son fiables a bajas velocidades de rotación porque el rotor no genera la suficiente carga electrostática para su correcta medición [7], [8] y por otro lado, los fotoeléctricos no se desempeñan correctamente en ambientes con predominio del polvo [6].

Gracias al reciente desarrollo de sensores ópticos y de las técnicas de procesamiento de imágenes, surgieron procedimientos basados en imágenes para la medición de la velocidad de rotación, los cuales ofrecían una alternativa prometedora a las técnicas convencionales. En comparación con las técnicas convencionales, que utilizaban sensores ópticos, magnéticos o electrostáticos; la medición es remota, no necesita de un acceso físico con la maquinaria, es de simple instalación, alta robustez y de gran aplicabilidad [3]. Además, las imágenes presentan una gran cantidad de información que permite obtener la velocidad de rotación de diferentes objetos presentes en el video sin necesidad de adicionar más equipamiento. Esto posibilita que el monitoreo de condición o el diagnóstico de fallas sea mucho más completo y eficiente al que ofrecían las técnicas convencionales [3]. Por estas razones fue seleccionado este tipo de sensores para nuestro propósito.

Los sistemas de medición existentes que se basan en el principio de imagen, comúnmente usan métodos de dominio espacial que determinan la relación del desplazamiento angular del objeto giratorio a la diferencia de tiempo entre dos cuadros secuenciales. La extracción de desplazamiento se determina buscando puntualmente los puntos correspondientes entre dos cuadros secuenciales y, por lo tanto, tiene una alta complejidad de cálculo. Además, la localización del objeto giratorio en la imagen puede verse afectada negativamente por el desenfoque de movimiento [3]. Para garantizar la precisión de la medición se han utilizados cámaras de altas velocidades. Guo en [9], propone determinar el ángulo de rotación de una superficie no plana de un objeto cilíndrico utilizando el algoritmo de Lucas-Kanade. Zhong en [10], plantea un sistema de medición donde al rotor se le coloca un patrón de franjas de doble densidad de seno variable para poder calcular la velocidad de rotación de manera precisa y eficiente. Zhu en [11], utiliza la transformada de Hough para detectar los bordes y las líneas rectas. Con la diferencia de la posición de dichas líneas pudo hallar el ángulo de rotación y con este, la velocidad angular. Para disminuir el alto coste computacional y el empleo de las cámaras de alta velocidad que son utilizados en los artículos anteriormente mencionados, Wang en [2], [3], [12], plantea métodos para la determinación de la velocidad rotacional a partir de sensores ópticos de bajo costo mediante evaluación de similitud y análisis espectral.

En la industria cubana, el desarrollo y aplicación de herramientas que permitan el monitoreo de la condición de los sistemas a partir de la velocidad de rotación está en sus inicios o no se emplean eficientemente. En Cuba solo se utilizan tacómetros para la determinación de la velocidad en el monitoreo y control de los procesos industriales. De manera particular, no se cuenta con un sistema de estimación de la velocidad de rotación a través de sensores ópticos que permita aprovechar las ventajas mencionadas anteriormente. Para solucionar dicho problema, este trabajo se trazó como objetivo el desarrollo de un sistema para la estimación de la velocidad de rotación a través de sensores ópticos de bajo costo.

En la sección 2 se presenta una introducción a la estimación de la velocidad de rotación, a través del procesamiento de imágenes y el cálculo del nivel de similitud y el análisis espectral. En la sección 3 se presenta la metodología seguida en la investigación. En la sección 4 se presentan resultados del trabajo en entorno simulado, mientras que en la sección 5 se aportan los correspondientes al caso del trabajo con imágenes reales. Al final se aporta un grupo de conclusiones.

2. ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN A TRAVÉS DEL CÁLCULO DEL NIVEL SIMILITUD Y ANÁLISIS ESPECTRAL.

En este trabajo se utilizaron los métodos explicados por Wang en [2], [3], [12], en los cuales plantea dos formas para la determinación de la velocidad de rotación a partir del cálculo de la similitud de las imágenes y su análisis espectral. Para lograr dicho objetivo utiliza una etapa de pre-procesamiento donde emplea el filtro gaussiano, la ecualización de la imagen y la transformada circular de Hough, para eliminar toda información no relacionada con el rotor. Para el cálculo del nivel de similitud, los autores de [2], [3], utilizaron diferentes algoritmos como: la correlación bidimensional (CORR2), fidelidad de la información visual y similitud estructural, siendo la CORR2 la que obtuvo los mejores resultados. En el análisis espectral se utilizó la transformada rápida de Fourier.

El filtro gaussiano es uno de los filtros más empleados en el procesamiento digital de imágenes pues atenúa con mayor efectividad el ruido gaussiano [14]. Este filtro es modelado de forma discreta por las siguientes ecuaciones:

$$hg(n_1, n_2) = e^{-(n_1^2 + n_2^2)/2\sigma^2} \quad (1)$$

$$h(n_1, n_2) = \frac{hg(n_1, n_2)}{\sum_{n_1} \sum_{n_2} hg(n_1, n_2)} \quad (2)$$

donde $h(n_1, n_2)$ son los coeficientes del filtro, σ es la desviación estándar, y n_1, n_2 representan las posiciones dentro de la máscara.

La ecualización del histograma es una operación que incrementa el rango dinámico y por ende el contraste de la imagen. Según [20], la ecualización permite mapear la probabilidad de ocurrencia de cada intensidad r_k de la imagen origen con la intensidad correspondiente s_k en la imagen resultante, tal y como se refleja a través de la siguiente ecuación:

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p(r_k) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{MN} \quad (3)$$

donde

$$j = 0, 1, 2, \dots, L-1;$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, L-1;$$

s_k : nivel de intensidad en la imagen resultante

r_k : nivel de intensidad en la imagen origen

n_j : número de píxeles con intensidad j

MN : número total de píxeles en la imagen

La Transformada Circular de Hough (CHT), según [15], es un algoritmo comúnmente usado en el procesamiento de imágenes para la identificación y detección de círculos. En dependencia del enfoque que presenta la implementación del algoritmo, aumento de la tasa de detección o disminución de la complejidad computacional, la CHT sufre una serie de modificaciones. Sin embargo, en general, hay tres pasos esenciales que son comunes a todos:

- (1) El cálculo de la matriz de acumulación, donde los píxeles de mayor gradiente se designan como píxeles candidatos y estos dibujan a su alrededor un círculo con radio fijo.
- (2) La estimación del centro, donde los píxeles que pertenecen a las circunferencias formadas por los diferentes píxeles candidatos se acumulan en una matriz para determinar el centro del círculo y donde dichos centros se estiman detectando los picos de la matriz.
- (3) La estimación del radio, que si se usa el mismo acumulador para más de un valor de radio, como comúnmente se hace en los algoritmos CHT, los radios de los círculos detectados deben estimarse como un paso separado.

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN MEDIANTE DISPOSITIVOS ÓPTICOS DE BAJO COSTO

La Correlación bidimensional, según [2], es el método de establecer un grado de probabilidad de que exista una relación lineal entre las cantidades medidas. Este indicará el grado de similitud entre dos imágenes mediante un coeficiente, el cual estará entre: $0 \leq r \leq 1$. Cuando $r = 0$ no existirá relación y cuando $r = 1$ serán completamente idénticas. Como el coeficiente de correlación es completamente invariante a transformaciones lineales de X e Y , ofrece un robusto rendimiento a prueba de ruido y es insensible a la variación uniforme de brillo o contraste en una imagen.

Para dos imágenes X e Y con una resolución de $m \times n$ píxeles, el coeficiente de correlación (r) se define:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [X(i, j) - \bar{X}][Y(i, j) - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [X(i, j) - \bar{X}]^2 * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [Y(i, j) - \bar{Y}]^2}} \quad (4)$$

donde $X(i,j)$ e $Y(i,j)$ son los valores de escala de grises en el punto (i,j) en las imágenes X e Y , respectivamente; y \bar{X} e \bar{Y} son la media de los valores de las matrices de intensidad de X e Y , respectivamente.

3. METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizaron dos métodos para la determinación de la velocidad de rotación. Ambos métodos se basan en el procesamiento digital de imágenes a partir de grabaciones de video hechas a un rotor para la determinación de su velocidad de rotación y están basados en los artículos [2], [3], [12]. El primero, como se observa en la Fig. 1 (a), utiliza una simple marca hecha en la sección transversal del rotor para resaltar las características de la región de interés. Mientras que el otro método emplea la superficie lateral no homogénea del rotor como se aprecia en la Fig.1 (b). Para facilitar la comprensión de lo abordado en este trabajo, se identificará como “método 1” al que utiliza la sección transversal de rotor para su funcionamiento (Fig. 1 (a)) y como “método 2”, al que utiliza la superficie lateral (Fig. 1(b)).

Para la determinación de la velocidad de rotación se graba un video donde se observa el movimiento rotatorio del rotor para luego procesarlo. El video a procesar es fragmentado en las imágenes que lo componen para facilitar el procesamiento y obtención de la velocidad de rotación. Dichas imágenes pasan por una etapa de pre-procesamiento para mejorar sus cualidades. Luego pasan por una etapa de cálculo del nivel de similitud entre la primera imagen y las subsiguientes. Esta etapa da como resultado una señal continua y periódica en el dominio del tiempo, siendo su periodo el tiempo que demora el rotor en dar una vuelta completa. Luego, esta señal pasa por una etapa de análisis espectral a través de la Transformada Rápida de Fourier[2]. Esta etapa permite identificar con facilidad la frecuencia de rotación de la señal pues es la frecuencia de mayor amplitud en el espectro. Para finalizar, se obtiene la velocidad de rotación mediante la siguiente ecuación (donde f es la frecuencia de rotación de mayor amplitud):

$$V_{RPM} = 60 * f \quad (5)$$

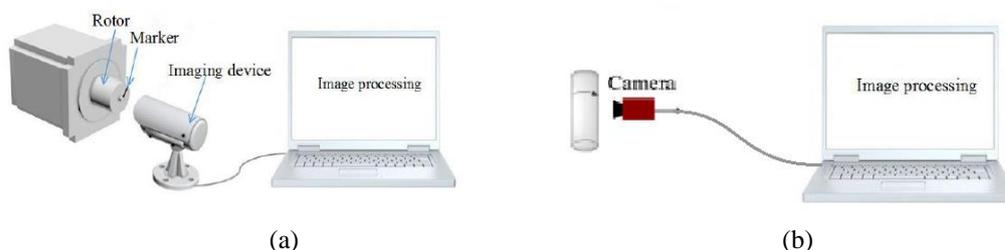


Figura 1: Disposición del sistema de medición. (a) Utilizando la sección trasversal del rotor, (b) Utilizando la superficie lateral del rotor.

Para dar cumplimiento al teorema de Nyquist, este método, junto con una cámara que, para los experimentos, tendrá una frecuencia de muestreo de 30 cuadros por segundo (fps), puede llegar a medir velocidades de rotación de hasta

900 rpm (Revoluciones Por Minuto). En la siguiente ecuación se muestra cómo se obtienen la velocidad de rotación máxima, siendo f_m la frecuencia de muestreo del dispositivo óptico:

$$V_{RPM} = 30 * f_m \quad (6)$$

Utilizando la ecuación (6) se obtiene la velocidad de rotación máxima que es capaz de medir ambos métodos.

$$V_{RPM} = 30 * f_m = 30 * 30 = 900 \text{ RPM}$$

La etapa de pre-procesamiento, según [3], ayuda a mejorar la calidad visual de las imágenes adquiridas y el rendimiento de las mediciones. En esta etapa se empleó un filtro gaussiano para reducir el ruido gaussiano de las imágenes y mejorar la relación señal-ruido. Para mejorar el contraste de las imágenes se utilizó la ecualización de la imagen. Como el área de interés del método 1 es circular, se implementó la transformación circular de Hough para poder extraerla con facilidad y así evitarla interferencia del fondo ambiental. Esto permite que la complejidad computacional se reduzca, pues disminuye la cantidad de píxeles a procesar. En el método 2 se empleó la técnica de detección de contornos Canny para realzar los bordes e imperfecciones que presenta la superficie lateral.

En la etapa del cálculo del nivel de similitud se utilizó la Correlación bidimensional, CORR2, por ser el algoritmo que presentó los mejores resultados en [2], [3], [12]. En la Fig. 2 se representa el algoritmo explicado hasta el momento, con el empleo de los métodos 1 y 2.

Para comprobar su funcionamiento, se trabajó con videos creados en entornos simulados y reales. Para la validación de los métodos se utilizaron los parámetros de error relativo y desviación estándar normalizada. En ambos parámetros se analizaron las estimaciones de velocidad de rotación obtenidas por los métodos contra la velocidad real conocida que presentaba cada patrón de imágenes, en caso de que sea en entornos simulados, o la obtenida por un tacómetro, si los videos son reales.

El error relativo determina la precisión de la medición, pues da la proporción del error con respecto al valor exacto de la medición. Este se calcula a través de la siguiente expresión:

$$e_r = \frac{N_m - N_r}{N_r} * 100 \quad (7)$$

donde N_m es el valor medido y N_r es el valor real.

La desviación estándar es la medida de dispersión más común, la cual indica qué tan dispersos están los datos con respecto de la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos. Su expresión está dada por:

$$\delta = \frac{\sigma}{N_m} * 100 \quad (8)$$

donde σ es desviación estándar y $\overline{N_m}$ es el valor promedio de los valores medidos.

4. CARACTERÍSTICAS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SIMULACIÓN

Para comprobar el rendimiento de los métodos se utilizaron imágenes simuladas que presentaban ciertos patrones. Para la creación de los patrones se tuvo en cuenta la representación de los cortes del rotor, transversal y longitudinal, que utiliza cada método. Las imágenes sin ruido se generaron en un programa computacional con un tamaño de

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN MEDIANTE DISPOSITIVOS ÓPTICOS DE BAJO COSTO

329x307 píxeles. Se buscó que predominaran colores que cuando se transformaran a escalas de grises, el histograma obtenido tuviera la mayor cantidad de píxeles con intensidades que estuvieran aproximadamente en el medio del mismo y en el rango de 100-175. Se eligió este rango de intensidad para poder observar los efectos que produce la adición de ruido a las imágenes. Para la elaboración de las imágenes con ruido se utilizaron como base las imágenes creadas sin ruido y se le añadió ruido gaussiano y sal y pimienta por ser los principales modelos de ruido empleados en el procesamiento digital de imágenes [14]. Además, se analizó la respuesta de los patrones ante diferentes frecuencias de rotación, utilizando 1.25 Hz y 7.5 Hz. En los artículos [2], [3], [12] se obtuvo como resultado que a medida que aumentaba la frecuencia de rotación, mejoraba la efectividad de los métodos; para simular esa situación y para comparar resultados se emplearon dichas frecuencias. También se comprobó la efectividad del método 2 ante diferentes patrones que pueda presentar la superficie del rotor. Para lograr esto se utilizaron dos tipos de marcas, una a base de rayas y otras a base de puntos, las cuales se denominarán como patrón 1 y patrón 2, respectivamente, del método 2. En la Fig. 3 se aprecian los diferentes patrones para una frecuencia de 7.5 Hz y en la Fig.4 se observan estos patrones con la adición de ruido.

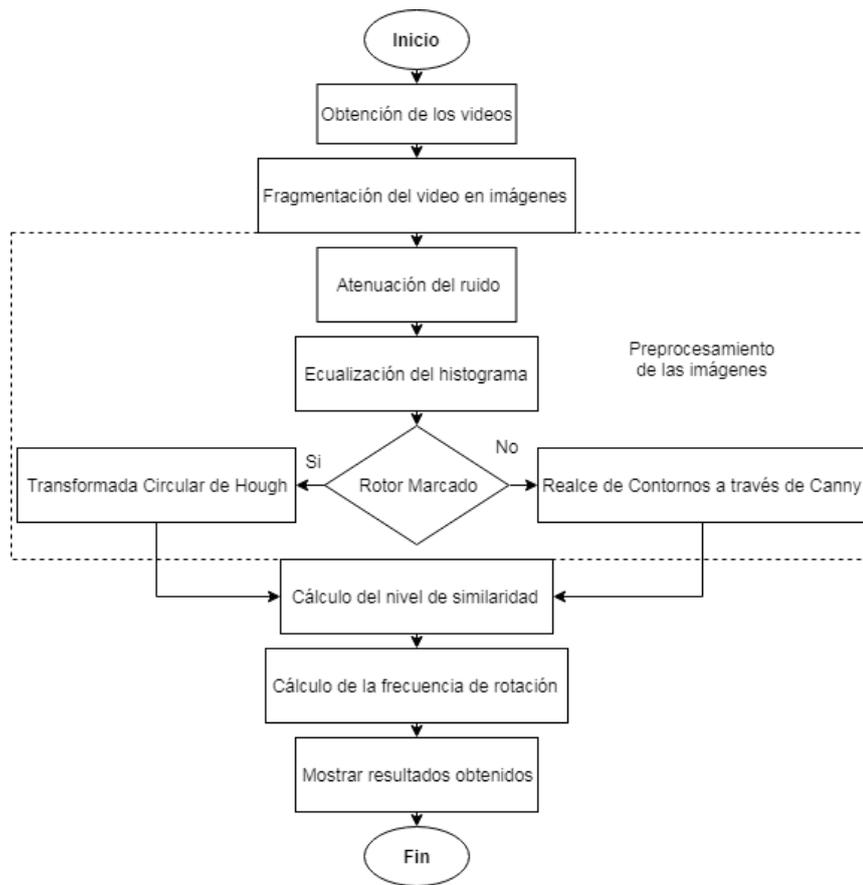
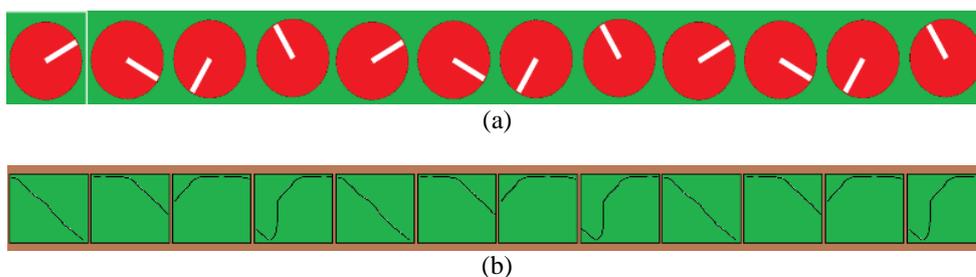


Figura 2: Diagrama del funcionamiento de los métodos utilizados



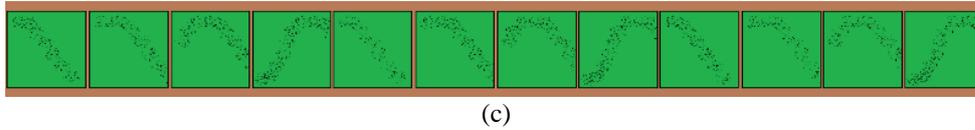


Figura 3: Patrones simulados utilizados para la comprobación de los métodos.(a) Patrón utilizado en el método 1, (b) Patrón 1 utilizado en el método 2, (c) Patrón 2 utilizado en el método 2.

En cada prueba se aplicó un único ruido y se modificaron sus parámetros para analizar el comportamiento del método. Se utilizó un ruido gaussiano con media -80 y +80, con una variación de 50 y 200. Se emplearon esas medias para ver el comportamiento de los métodos ante bajos y altos niveles de intensidad. Mientras que se usó dichas varianzas para analizar cómo afecta el fenómeno *blur* o desenfoque de la imagen. Se decidió utilizar dichos valores de varianzas para tratar de saturar a la menor cantidad de píxeles. Mientras que con respecto al ruido sal y pimienta se varió la densidad de píxeles afectados de 1 % a 50 %.

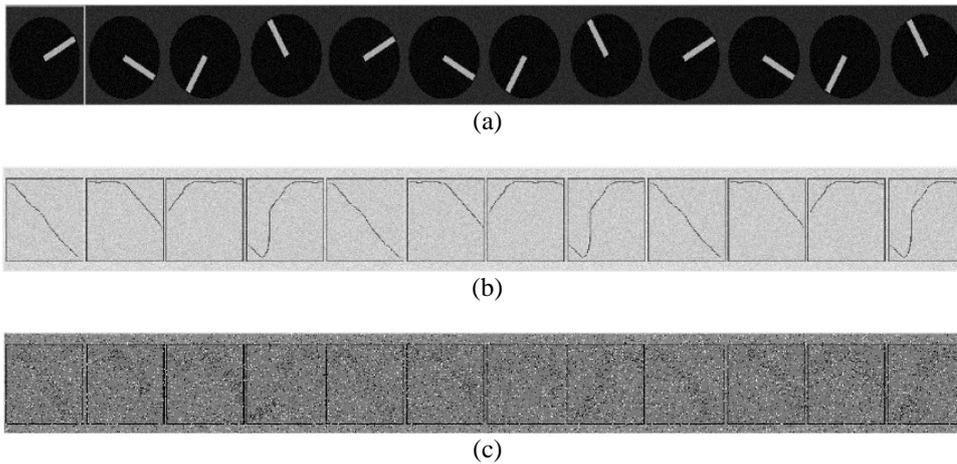


Figura 4: Patrones simulados con ruido utilizados para la comprobación de los métodos. (a) Patrón con ruido gaussiano de media -80 y varianza 50, (b) Patrón con ruido gaussiano de media 80 y varianza 200, (c) Patrón con ruido sal y pimienta con densidad del 50 %.

Para la realización de las pruebas se hicieron 300 repeticiones por cada patrón. Con los resultados obtenidos se calculó la media de las frecuencias obtenidas y del error relativo y, además, la desviación estándar normalizada. El número de repeticiones responde a que con otro valor el promedio no varió en más del 1 %. En las Tablas 1, 2 y 3 se observan los resultados obtenidos por los métodos aplicados a patrones contaminados con ruido gaussiano. Mientras que en las Tablas 4, 5 y 6 se aprecian los resultados obtenidos utilizando patrones con ruido sal y pimienta.

Tabla 1: Respuesta del método 1 frente al ruido gaussiano.

Ruido Gaussiano		Frecuencia de rotación 1.25Hz			
Media	Varianza	SNR (dB)	Media de las frecuencias obtenidas	Media del error relativo (%)	Desviación Estándar Normalizada (%)
-80	50	24.037	1.25	0	0
	200	18.008	1.25	0	0
80	50	24.037	1.25	0	0
	200	18.017	1.25	0	0

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN MEDIANTE DISPOSITIVOS ÓPTICOS DE BAJO COSTO

Frecuencia de rotación 7.5 Hz					
-80	50	24.028	7.5	0	0
	200	18.008	7.5	0	0
80	50	24.028	7.5	0	0
	200	18.008	7.5	0	0

Tabla 2: Respuesta del método 2 frente al ruido gaussiano utilizando el patrón 1.

Ruido Gaussiano		Frecuencia de rotación 1.25Hz			
Media	Varianza	SNR (dB)	Media de las frecuencias obtenidas	Media del error relativo (%)	Desviación Estándar Normalizada (%)
-80	50	25.068	1.25	0	0
	200	19.047	1.25	0	0
80	50	25.068	1.25	0	0
	200	19.047	1.25	0	0
Frecuencia de rotación 7.5 Hz					
-80	50	25.073	7.5	0	0
	200	19.053	7.5	0	0
80	50	25.073	7.5	0	0
	200	19.052	7.5	0	0

Tabla 3: Respuesta del método 2 frente al ruido gaussiano utilizando el patrón 2.

Ruido Gaussiano		Frecuencia de rotación 1.25 Hz			
Media	Varianza	SNR (dB)	Media de las frecuencias obtenidas	Media del error relativo (%)	Desviación Estándar Normalizada (%)
-80	50	25.057	1.7625	41	40.2385
	200	19.036	6.6875	435	51.6223
80	50	25.057	1.2625	1	9.8514
	200	19.036	1.3875	11	28.1883
Frecuencia de rotación 7.5 Hz					
-80	50	25.065	7.5000	0	0
	200	19.045	7.5000	0	0
80	50	25.065	7.5000	0	0
	200	19.044	7.5000	0	0

En la Tabla 1 se aprecia que para un ruido gaussiano de media ± 80 y una varianza de 50 y 200, el método 1 mostró, para ambas velocidades, un rendimiento ideal pues presentó un error relativo y una desviación estándar normalizada del 0 %. Este resultado era el esperado porque la marca por el que se guía el algoritmo presenta, aún, un alto contraste y es fácilmente identificable.

En las Tablas 2 y 3 se observa el desenvolvimiento del método 2 ante el ruido gaussiano. El patrón 1 se utilizó en la ejecución de las pruebas cuyos resultados se observan en la Tabla 2, mientras que los resultados obtenidos a través del patrón 2 se muestran en la Tabla 3. En la Tabla 2 se obtuvieron resultados idóneos, error relativo y desviación estándar del 0 %, para los niveles de ruido empleados, cumpliendo con lo esperado.

En la Tabla 3 se observan los comportamientos para diferentes frecuencias de rotación. Para 7.5 Hz el método no presentó ningún problema en dar una respuesta correcta, comportamiento que supera lo esperado. Para 1.25 Hz se obtuvieron valores de frecuencia erróneos, con altos errores relativos y desviaciones estándar normalizadas. Para 1.25 Hz, se obtuvo un resultado esperado, se observó que para un ruido de media -80 y varianza 50 se obtuvo un error relativo del 41 % y un 40 % en la desviación estándar normalizada, mientras que para un ruido de media 80 y de igual varianza, se obtuvo 1 % y 10 %, de error relativo y desviación estándar respectivamente. Esto indica que a diferentes medias e igual varianza existe una diferencia de un 40 % en el error relativo y un 30 % en la desviación estándar normalizada por lo que se puede concluir que el método, para bajas frecuencias de rotación, presenta mejores resultados con ruido de media alta, coincidiendo con los resultados obtenidos en [2], [3], [12].

Tabla 4: Respuesta del método 1 frente al ruido Sal y Pimienta.

Ruido Sal y Pimienta	Frecuencia de rotación 1.25Hz			
Densidad (%)	SNR (dB)	Media de las frecuencias obtenidas	Media del error relativo (%)	Desviación Estándar Normalizada (%)
10	13.943	1.2500	0	0
50	5.7761	1.2625	1.0000	9.8514
Frecuencia de rotación 7.5 Hz				
10	13.982	7.5000	0	0
50	5.782	7.5000	0	0

Tabla 5: Respuesta del método 2 frente al ruido Sal y Pimienta utilizando el patrón 1.

Ruido Sal y Pimienta	Frecuencia de rotación 1.25Hz			
Densidad (%)	SNR (dB)	Media de las frecuencias obtenidas	Media del error relativo (%)	Desviación Estándar Normalizada (%)
10	18.289	1.2500	0	0
50	14.739	1.9375	55	125.889
Frecuencia de rotación 7.5Hz				
10	20.052	7.5000	0	0
50	15.027	7.5000	0	0

En las Tablas 4, 5 y 6 se aprecia que los métodos tuvieron un buen rendimiento para la frecuencia de rotación de 7.5 Hz, obteniéndose en todas las simulaciones los resultados esperados con una exactitud del 100 %. Dicho comportamiento no concuerda con lo esperado porque se esperaba que los métodos dieran algún error con dichos niveles de ruido. Para la frecuencia de 1.25 Hz, el método 1 soportó altos niveles de ruido llegando al 50 % de píxeles dañados, y presentando un error relativo del 1 % y una desviación estándar normalizada del 10 %. Mientras que para el método 2, se observó que, en dependencia del patrón utilizado, presentó diferentes comportamientos. Con la utilización del patrón 1, el método 2 tuvo un error relativo del 55 % y una desviación estándar de 125 % para un nivel de ruido sal y pimienta del 50 %. Mientras que con el patrón 2, el método solo soportó una densidad del 1 %, obteniéndose un error relativo de 13 % y una desviación estándar normalizada aproximadamente del 30 %. Los resultados presentados para dicha frecuencia eran esperados, menos para el patrón 2 del método 2 pues se obtuvo valores muy altos en media de frecuencias, error relativo y desviación estándar normalizada para valores de ruido relativamente pequeños.

Tabla 6: Respuesta del método 2 frente al ruido Sal y Pimienta utilizando el patrón 2.

Ruido Sal y Pimienta	Frecuencia de rotación 1.25Hz			
Densidad (%)	SNR (dB)	Media de las frecuencias obtenidas	Media del error relativo (%)	Desviación Estándar Normalizada (%)
1	19.169	1.4125	13	29.7614
5	14.739	2.9500	136	80.5129
Frecuencia de rotación 7.5 Hz				
1	19.728	7.5000	0	0
5	18.374	7.5000	0	0

Con respecto a los patrones, se pudo constatar que deben estar bien definidos, pues en dependencia de cuán reconocible sean, los resultados obtenidos tendrán unos bajos valores de error relativo y desviación estándar normalizada. Esto queda demostrado en las Tablas 2, 3, 5 y 6, pues con el mismo método, pero con diferentes patrones, se obtuvo una gran diferencia en su robustez ante el ruido gaussiano y de sal y pimienta.

5. CARACTERÍSTICAS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALES

Para la grabación de los videos se utilizó un dispositivo móvil debido a que este tipo de equipo es ampliamente utilizado por la gran mayoría de personas en su vida cotidiana. El terminal seleccionado es de marca Samsung, modelo Galaxy S7. Este presenta una cámara principal de 12 megapíxeles, un tamaño de pixel de 1.4 μm , una apertura focal de 1.7, una distancia focal de 26 mm, un tamaño del sensor de 1/2.55", auto HDR, estabilización óptica (OIS), Dual Pixel PDAF y flash tipo LED. Además, respecto al video graba en 4K y 1080 a 30 fps, 1080 a 60 fps y 720p a 240 fps con sonido estéreo estabilizado óptica (OIS) y electrónicamente (EIS) y HDR [16].

Los videos tuvieron las siguientes características: presentaron una frecuencia de muestreo de 30 fps porque es la frecuencia que está presente en todos los dispositivos ópticos: webcam, móviles, cámaras. El video tuvo formato VGA de 640x480 pixeles para disminuir la complejidad computacional, una duración de 5 minutos y la utilización de un trípode para mejorar la estabilidad y evitar movimientos involuntarios. La utilización del ventilador Midea, modelo KYT30-L1 para obtener los videos que presentaban una baja velocidad de rotación. Mientras que se empleó el ventilador Wahson Electric MFG CO Shanghai, modelo 3060-2M para grabar video con una alta velocidad.

Para la comprobación de los resultados obtenidos se utilizó un tacómetro analógico de contacto marca Smiths, modelo K3690. Este presenta dos rangos de medición, uno hasta 1000 rpm y el otro hasta 5000 rpm con una resolución mínima de 5 y 10 rpm, respectivamente.

Para la aplicación del método 1 se utilizó un círculo de cartón de color blanco que tenía un radio de 4 cm y la marca tenía un ancho de 3 mm. Mientras que para el método 2 se empleó un rodillo de cartón. Estos se fijaron en el lugar que se quería medir la velocidad de rotación, distribuidor direccional del aire y protector del eje.

Teniendo como referencia la velocidad promedio obtenida por el tacómetro, se validaron los resultados mediante el error relativo y la desviación estándar normalizada para determinar la exactitud y la variabilidad del experimento, respectivamente.

El rendimiento de los métodos ante diferentes velocidades de rotación se pudo analizar a través de videos que presentaban patrones con velocidades distintas. Mediante el uso del tacómetro, se determinó que los patrones que giraban a baja velocidad presentaban una frecuencia de 0.0833 Hz, mientras que los que rotaban a alta velocidad tenían una frecuencia de 13.33 Hz.

En las figuras Fig.5 y Fig. 6 se muestran los resultados obtenidos por ambos métodos para un video que mostraba al objetivo girar con baja velocidad. Mientras que en las figuras Fig.7 y Fig. 8 se pueden observar los resultados para un patrón que gira a altas velocidades. Cada una de las figuras muestra la frecuencia de rotación, resultado del procesamiento de la señal de similitud a partir de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

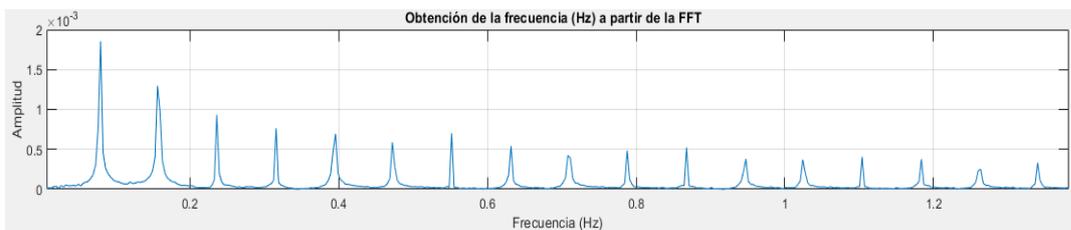


Figura 5: Resultados obtenidos por el método 1 para velocidad de rotación de 0.0833 Hz.

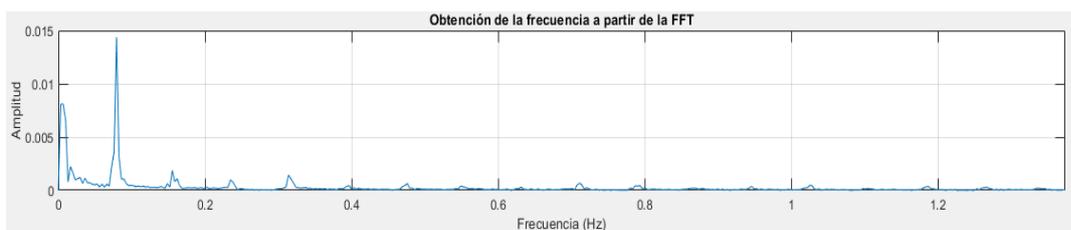


Figura 6: Resultados obtenidos por el método 2 para velocidad de rotación de 0.0833 Hz.



Figura 7: Resultados obtenidos por el método 1 para velocidad de rotación de 13.33 Hz

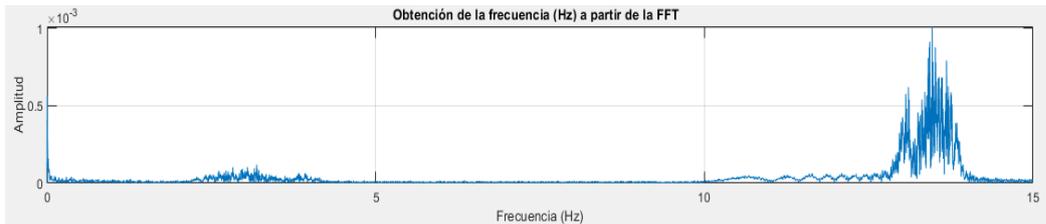


Figura 8: Resultados obtenidos por el método 2 para una velocidad de rotación de 13.33 Hz.

En las Tablas 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos de los métodos a partir de seis grabaciones que presentan videos del objeto que rota a baja velocidad. Mientras que en las Tablas 9 y 10 se aprecian los valores obtenidos a partir de los videos del objeto rotando a altas velocidades.

En las Tablas 7 y 8 los valores logrados rondan los 0.0833 Hz, frecuencia obtenida mediante el tacómetro. Ambos métodos presentaron un error relativo menor al 5 % y una desviación estándar normalizada menor al 0.4 %. El rendimiento de ambos métodos satisface los requisitos de la aplicación ya que los resultados presentan un alto grado de similitud. El alto valor del error relativo conseguido a bajas frecuencias se debe a que el valor real que se obtuvo del tacómetro está en el orden de la resolución del dispositivo, 0.0833 Hz.

Tabla 7: Resultados logrados a partir de videos con baja velocidad de rotación utilizando el método 1.

Método 1_fr = 0.0833 Hz		
Videos	Frecuencia Obtenida (Hz)	Error relativo
1	0.0798	4.2017
2	0.0799	4.0816
3	0.0798	4.2017
4	0.0800	3.9616
5	0.0793	4.8019
6	0.0796	4.4418
Media	0.0797	4.2817
Desviación Estándar Normalizada (%)	0.3141	

Tabla 8: Resultados logrados a partir de videos con baja velocidad de rotación utilizando el método 2.

Método 2_fr = 0.0833 Hz		
Videos	Frecuencia Obtenida (Hz)	Error relativo
1	0.0798	4.2017
2	0.0794	4.6819
3	0.0798	4.2017

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN MEDIANTE DISPOSITIVOS ÓPTICOS DE BAJO COSTO

4	0.0793	4.8019
5	0.0798	4.2017
6	0.0798	4.2017
Media	0.0796	4.3818
Desviación Estándar Normalizada (%)	0.2946	

Tabla 9: Resultados logrados a partir de videos con alta velocidad de rotación utilizando el método 1.

Método 1_fr = 13.33 Hz		
Videos	Frecuencia Obtenida (Hz)	Error relativo
1	13.23	0.7502
2	13.42	0.6752
3	13.31	0.1500
4	13.20	0.9752
5	13.23	0.7502
6	13.28	0.3751
Media	13.28	0.6127
Desviación Estándar Normalizada (%)	0.6013	

En las Tablas 9 y 10 se obtuvieron valores coherentes con el valor obtenido por medio del tacómetro, pues estaban muy cercanos a 13.33 Hz y con poca variabilidad. Esto está sustentado a que en ambas tablas el error relativo tuviera una media menor al 0.8 % y una desviación estándar normalizada menor al 1 %. Cabe destacar que el método 1 se acercó por defecto al valor original, mientras que el método 2 se aproximó por exceso.

En las tablas 7, 8, 9 y 10 se obtuvieron los resultados esperados y coincidieron con los obtenidos en los artículos [2], [3], [12], pues en estos presentaron un error relativo menor al 1 %, 0.6 % y 1 %, respectivamente, y una desviación estándar normalizada del 0.6 %.

Tabla 10: Resultados logrados a partir de videos con alta velocidad de rotación utilizando el método 2.

Método 2_fr = 13.33 Hz		
Videos	Frecuencia Obtenida (Hz)	Error relativo
1	13.36	0.2251
2	13.36	0.2251
3	13.43	0.7502
4	13.43	0.7502
5	13.38	0.3751
6	13.69	2.7007
Media	13.44	0.8377
Desviación Estándar Normalizada (%)	0.3141	

Además, ambos métodos lograron ser efectivos, bastante exactos y de una variabilidad baja debido a los bajos valores de los parámetros que se utilizaron para validar los experimentos. El rendimiento de los métodos a altas velocidades se destaca por haber logrado los mejores resultados.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se implementaron y validaron los algoritmos de procesamiento digital de imágenes para la detección de la velocidad de rotación utilizando cámaras convencionales de bajo costo. Se comprobó el rendimiento de los algoritmos a través de señales con diferentes frecuencias de rotación creadas en un entorno de simulación y obtenidas en entornos reales. Mediante esas señales se estimaron con una adecuada efectividad las velocidades de rotación empleadas. Del trabajo de simulación se pudo concluir que la robustez de los métodos frente a diferentes

tipos de ruido dependió del patrón que presentó el rotor. En el trabajo con videos reales ambos métodos presentaron un desempeño correcto y preciso para altas velocidades de rotación. Mientras que para bajas se obtuvieron grandes valores de error relativo debido a que el valor real obtenido por el tacómetro está en el orden de la resolución del dispositivo.

REFERENCIAS

- [1] Y. Li, F. Gu, G. Harris, A. Ball, N. Bennett, y K. Travis, «The measurement of instantaneous angular speed», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 19, n.º 4, pp. 786-805, 2005.
- [2] Y. Wang, L. Wang, y Y. Yan, «Rotational speed measurement through digital imaging and image processing», en *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Torino, Italy, may 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969697.
- [3] T. Wang, Y. Yan, L. Wang, y Y. Hu, «Rotational Speed Measurement Through Image Similarity Evaluation and Spectral Analysis», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 46718-46730, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2866479.
- [4] M. Ruiz, F. Hernández, J. Gómez y E. Palomino, «Tacho-less automatic rotational speed estimation (TARSE) for a mechanical system with gear pair under non-stationary conditions», *Measurement*, vol 145, pp.480-494, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.085>.
- [5] R. Myers, R. A. Islam, M. Karmarkar, y S. Priya, «Magnetolectric laminate composite based tachometer for harsh environment applications», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, n.º 12, p. 122904, sep. 2007, doi: 10.1063/1.2784959.
- [6] Y. S. Didosyan, H. Hauser, H. Wolfmayr, J. Nicolics, y P. Fulmek, «Magneto-optical rotational speed sensor», *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 106, n.º 1-3, pp. 168-171, sep. 2003, doi: 10.1016/S0924-4247(03)00158-4.
- [7] L. Wang, Y. Yan, Y. Hu, y X. Qian, «Rotational Speed Measurement Using Single and Dual Electrostatic Sensors», *IEEE Sensors J.*, pp. 1-1, 2014, doi: 10.1109/JSEN.2014.2368091.
- [8] L. Wang, Y. Yan, Y. Hu, y X. Qian, «Radial vibration measurement of rotary shafts through electrostatic sensing and Hilbert-Huang Transform», en *2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Taipei, Taiwan, may 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/I2MTC.2016.7520480.
- [9] J. Guo, C. Zhu, S. Lu, D. Zhang, y C. Zhang, «Vision-based measurement for rotational speed by improving Lucas-Kanade template tracking algorithm», *Appl. Opt.*, vol. 55, n.º 25, p. 7186, sep. 2016, doi: 10.1364/AO.55.007186.
- [10] J. Zhong, S. Zhong, Q. Zhang, y Z. Peng, «Measurement of instantaneous rotational speed using double-sine-varying-density fringe pattern», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 103, pp. 117-130, mar. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.10.011.
- [11] X. Zhu y S. Yu, «Measurement angular velocity based on video technology», en *2011 4th International Congress on Image and Signal Processing*, Shanghai, oct. 2011, pp. 1936-1940, doi: 10.1109/CISP.2011.6100574.
- [12] T. Wang, L. Wang, Y. Yan, y S. Zhang, «Rotational speed measurement using a low-cost imaging device and image processing algorithms», en *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Houston, TX, may 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC.2018.8409665.
- [13] C. Solomon y Breckon Toby, *Fundamentals of Digital Image Processing*. 2011.
- [14] T. J. Atherton y D. J. Kerbyson, «Size invariant circle detection», *Image and Vision Computing*, vol. 17, n.º 11, pp. 795-803, sep. 1999, doi: 10.1016/S0262-8856(98)00160-7.
- [15] «Samsung Galaxy S7 - Full phone specifications», *GSMARENA*. https://www.gsmarena.com/samsung_galaxy_s7-7821.php (accedido sep. 11, 2020).

SOBRE LOS AUTORES

Carlos Manuel Pérez Pino (ORCID: 0000-0002-6557-1491): Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, desde 2020. Trabaja en LACETEL, Instituto de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones. La Habana, Cuba.

Fidel Ernesto Hernández Montero (ORCID: 0000-0002-5003-2807): Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, 1995. Máster en Ciencias, 2000. Doctor en Ciencias Técnicas, 2006. Profesor de la Facultad de Telecomunicaciones, CUJAE. Investiga en el desarrollo de tecnología de monitoreo y diagnóstico industrial, así como en el desarrollo de sistemas de monitoreo de marcha a través de IMU.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses de los autores o de las instituciones a las cuales pertenece en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Carlos Manuel Pérez Pino:** preparación, creación y desarrollo del artículo, contribución a la idea y organización del artículo, sugerencias acertadas para la conformación de la versión final.
- **Fidel Ernesto Hernández Montero:** conceptualización, creación y desarrollo del artículo, revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

