

# Comparativa de técnicas de filtrado de imágenes para el procesamiento conjunto de las técnicas de Correlación Digital de Imágenes 2D y Proyección de Franjas

**L. Felipe Sesé, F.A. Díaz Garrido, R. Dorado Vicente**  
Dpto. de Ingeniería Mecánica y Minera. Universidad de Jaén  
lfelipe@ujaen.es

**P. Siegmann,**  
Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad de Alcalá

Palabras clave: Correlación Digital de imágenes 2D, proyección de franjas, filtrado RGB

*Las técnicas ópticas Correlación Digital de Imágenes 2D y proyección de Franjas están totalmente implantadas en el campo de la mecánica experimental. DIC 2D es usada para la determinación de desplazamientos en el plano y PF es utilizada para los desplazamiento fuera del plano. Actualmente se está trabajando sobre la unión de las dos técnicas y así poder determinar desplazamientos en el espacio sin necesidad de utilizar sistemas estereoscópicos.*

*El objetivo de este trabajo es la comparativa de dos técnicas de filtrado de imágenes para poder llevar a cabo la unión de dichas técnicas. En concreto, sobre la probeta objeto de estudio se imprime una distribución aleatoria de manchas conocida como speckle, y se le proyecta un patrón franjas. Con un filtro adecuado, es posible separar speckle y las franjas para poder aplicar ambas técnicas por separado.*

*Las técnicas de filtrado estudiadas en este trabajo se basan en que el patrón de franjas y el patrón de manchas aleatorias son de diferente color en el espectro RGB. Se propone una técnica de filtrado basada en la separación digital de colores empleando una cámara CCD color (RGB). Los resultados se comparan con los obtenidos empleando un filtrado basado en lentes filtrantes del mismo color (R y B).*

## 1. INTRODUCCIÓN

La realización de ensayos mecánicos mediante técnicas ópticas de campo completo se encuentra en claro crecimiento. Son técnicas que pueden ser no destructivas y no necesitan entrar en contacto con los elementos que se someten a ensayo, permitiendo extraer información valiosa para el conocimiento de las propiedades mecánicas del elemento o su comportamiento [1]. Estas técnicas ya han sido estudiadas con anterioridad, pero, en la mayoría de los casos, la necesidad de un procesamiento laborioso para la época había hecho que no se extendiera su uso. En la actualidad, las cámaras digitales y las herramientas informáticas, ambos en continua evolución, hace que día a día estas técnicas tengan cada vez más aplicaciones reales.

Correlación digital de imágenes en 2D es una técnica óptica de campo completo que permite la detección de los desplazamientos ocurridos en el plano[2]. Para ello se recurre a la incorporación sobre la superficie del elemento estudiado un patrón de pequeñas manchas, normalmente oscuras sobre fondo blanco, llamado speckle. Este patrón de speckle tiene como característica que es totalmente aleatorio y posee contraste entre las manchas y el fondo.

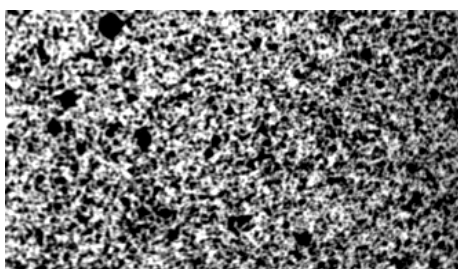


Figura 1 Patrón de speckle

De esta manera, si se intentara encontrar una pequeña porción de la imagen que posea ese patrón, con un nivel de gris medio característico, y se intenta encontrar una porción de similares características en el resto de la imagen, no se encontraría, ya que es exclusiva. En esta premisa se basa el procesado mediante Correlación Digital de Imágenes (DIC 2D). La técnica captura una imagen de referencia del elemento y seguidamente se realiza el ensayo, el cual imprimirá sobre dicho elementos, unos desplazamientos en el plano (x,y). De cada estado durante el proceso del ensayo se capturarán imágenes. A continuación se pasa a la etapa de correlado. En esta etapa, la imagen de referencia se divide en pequeñas porciones llamadas facetas de mismo tamaño  $(2M+1) \times (2M+1)$ , las cuales están asociadas al pixel central de cada faceta  $p_1(x_0, y_0)$ . Estas facetas, poseen un nivel de intensidad de gris característico. A continuación, el algoritmo elegido realizará una búsqueda de esa faceta alrededor del punto de mismas coordenadas pero la siguiente imagen capturada  $p_2(x_0, y_0)$ . Si ha experimentado un desplazamiento, el centro de la faceta buscada se encontrará en otras coordenadas  $p_2(x_1, y_1)$ .

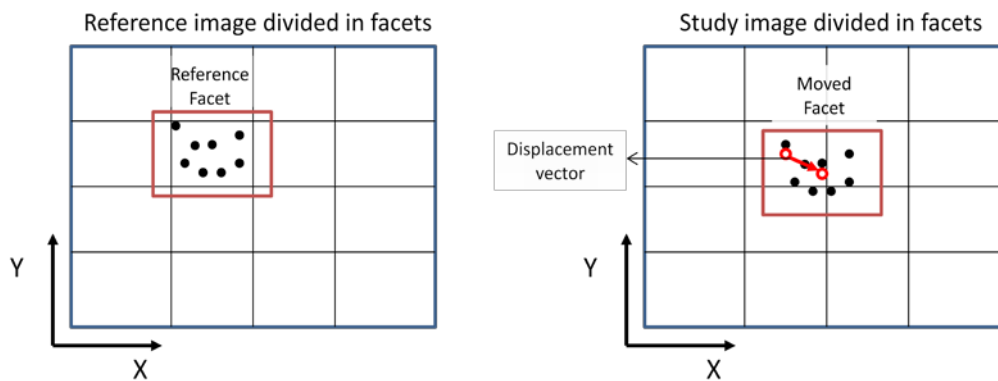


Figura 2. Procesado DIC 2D

De manera que se conocerá el desplazamiento en dirección x y en dirección y:

$$\Delta x = x_2 - x_1 \quad (1)$$

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

Sobre esta premisa se basa la técnica, que ha sido mejorada mediante algoritmos de búsqueda más rápidos y eficaces para obtener resultados más exactos al mismo modo que se reduce el tiempo de computación de estos. Los algoritmos más extendidos en la actualizada son los mostrados a continuación (Ecuaciones (1), (2), (3)) correspondiendo las funciones  $f(x_i, y_j)$  y  $g'(x'_i, y'_j)$  al cálculo del valor en la escala de grises que tiene la faceta de estudio en la imagen de referencia y en la imagen deformada [3][4]:

Correlación Cruzada (CC).

$$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j), g(x'_i, y'_j)] \quad (2)$$

Correlación Cruzada Normalizada (NCC).

$$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j), g(x'_i, y'_j)] / \bar{f} \bar{g} \quad (3)$$

Zero Correlación Cruzada Normalizada (ZNCC)

$$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{[f(x_i, y_j) - f_m] * [g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g} \right\} \quad (4)$$

Proyección de franjas es una técnica óptica interferométrica de campo completo que permite determinar una diferencia de cota fuera de plano (eje z) de una imagen con respecto a otra [5]. Ha sido ampliamente utilizada para la digitalización de objetos, metrología o aplicaciones mecánicas. El principio básico es la proyección de un patrón de franjas sobre una superficie de referencia o rejilla de paso  $p$  mediante un proyector. Estas franjas variarán senoidalmente en la dirección perpendicular a la franja proyectada, por lo que la distribución de intensidad de luz  $I$  en un pixel de la imagen de coordenadas  $(i,j)$  puede describirse de la siguiente manera [6]:

$$I(i, j) = A(i, j) + B(i, j)\cos(2\pi f + \phi(i, j)) \quad (5)$$

Donde  $A$  es la iluminación de fondo o ruido,  $B$  es la amplitud de la rejilla,  $f$  es la frecuencia del patrón proyectado y  $\phi$  es la fase de la onda senoidal. Si se obtiene una imagen en la que el objeto de referencia haya variado su forma, la fase habrá variado, por lo que determinando la diferencia de fase se podrá conocer el fuera de plano desplazamiento que existe en ese pixel respecto a la imagen de referencia como muestra la figura 3.

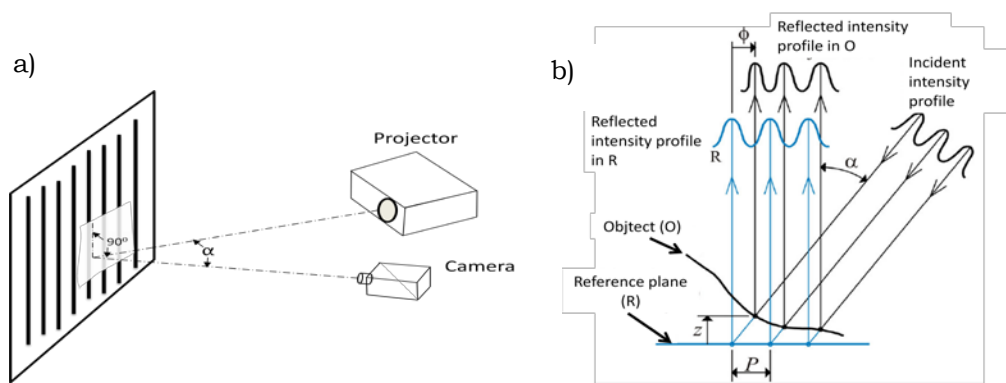


Figura 3. A) Set up de Proyección de franjas b)Esquema teórico de la técnica

Este desfase puede ser calculado por dos métodos principalmente, el método de variación de fase o phase shifting y el análisis de las imágenes en dominio de la frecuencia mediante Fourier.

Mediante Phase shifting es necesario el desplazamiento, real o virtual, de la rejilla proyectada, de forma que se puede despejar la fase  $\phi(i, j)$  de cada imagen [6].

$$\phi(i, j) = \arctan\left(\frac{2(I_2(i, j) - I_4(i, j))}{2I_3(i, j) - I_5(i, j) - I_1(i, j)}\right) \quad (6)$$

Para conseguir estos movimientos, imagen original se desplazara una distancia  $p/2$  en las dos direcciones  $i, j$  siendo:

$$I_1(i, j) = I(i, j - p/2), I_2(i, j) = I(i, j - p/4) \dots I_5(i, j) = I(i, j + p/2) \quad (7)$$

Teniendo en cuenta lo expuesto, la diferencia de fase entre la imagen de referencia y el objeto es obtenida de la siguiente manera:

$$\Delta\Phi = \Phi_{imagen2} - \Phi_{imagen1} \quad (8)$$

Si la diferencia de fase se analiza mediante el análisis en espectro de Fourier, el desfase relativo se define como [5]:

$$\Delta\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}(g_1(i, j))}{\text{Re}(g_2(i, j))}\right) \quad (9)$$

Siendo  $g_1$  y  $g_2$  las fases extraídas del espectro de Fourier de la imagen de referencia y de estudio respectivamente.

En ambos casos la fase extraída se presenta envuelta entre los valores  $-\pi$  y  $\pi$  por lo que necesita un procesado de desenvuelto conocido como unwrapping.

Sabiendo que DIC 2D ofrece datos de desplazamientos en el plano ( $\Delta x, \Delta y$ ), y Proyección de Franjas los ofrece fuera de plano ( $\Delta z$ ), surge la motivación de poder unir las técnicas para, mediante una sola cámara y un proyector, poder determinar los desplazamientos que ha sufrido un elemento en las tres direcciones del espacio. De esta manera se obtendrá una información más completa de los fenómenos ocurridos en el experimento y se multiplicarán las aplicaciones a las que se puede aplicar el método. Todo ello abaratando los costes de sistemas láser o estereoscópicos. Existen estudios en los que se realiza una digitalización previa mediante Proyección de Franjas y seguidamente se estudia la imagen mediante DIC 2D [7], pudiendo mejorar resultados de esta última técnica considerando los movimientos de sólido rígido. En algunos casos la captura de imágenes con patrones de franjas y speckle es secuencial [8], no pudiendo hacer ensayos dinámicos. Otros autores realizan la captura con más de una cámara [9], no aprovechando todo el potencial de la unión de las técnicas. Y en otros casos se recurre al filtrado en dominio de frecuencia para conseguir un patrón de franjas y otro de speckle, perdiendo mucha información [10]. En los citados trabajos no se ha conseguido unos resultados del todo satisfactorios para la implementación industrial de un sistema de detección de desplazamientos 3D con solo una cámara y proyector.

En esta comunicación se comparan dos metodologías para el uso de estas técnicas simultáneamente. Ambas se basen en asociar un color del espectro RGB a cada patrón característico, al speckle el color rojo y a las franjas el color azul. Mientras una recurre a los filtros físicos de color rojo y azul [11], la otra metodología recurrirá al uso de una cámara en color para su posterior filtrado [12][13].

Se expondrán las técnicas de filtrado y a continuación se compararán los y se evaluarán las ventajas de uno y otro método para finalizar con las conclusiones en base a los resultados obtenidos

## 2. FILTRADO DE IMÁGENES

Como se ha expuesto se recurre a la utilización de los colores del espectro RGB (Red, Green, Blue) para la unión de las técnicas. Esto se debe a la sencillez que tiene proyectar un color de este espectro mediante un proyector comercial LCD, el cual forma una imagen en color a partir de fuentes de luz Roja (R), verde (G) y azul (B). Adicionalmente, las imágenes adquiridas por una cámara CCD reconocen los colores mediante una máscara denominada filtro de Bayer. Esta máscara es básicamente un conjunto de 4 píxeles del sensor CCD. Cada uno de estos píxeles recoge un color del citado espectro de la manera que muestra la Figura. 4. De esta forma cada pixel recogerá la intensidad de su color asociado. Al almacenar la imagen, ésta estará compuesta realmente por tres imágenes, una que recoge la intensidad del color rojo (R), otra que recogerá la intensidad del color verde (G) y otra que recoge la intensidad del color azul (B). Por lo tanto se utiliza para esta comparativa un patrón de franjas azules puras y blancas proyectadas sobre una probeta blanca con patrón de speckle rojo puro.

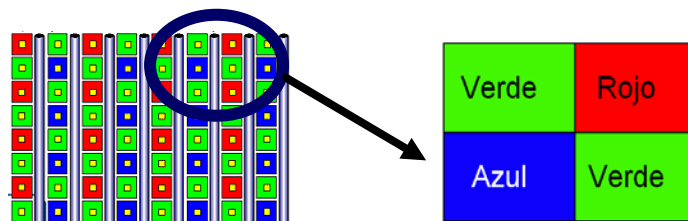


Figura 4. Sensor CCD con filtro Bayer

El primer método utilizado será la utilización de filtros físicos de color para la captura de la imagen. En este caso será necesaria la captura de dos imágenes para cada estado.

Una imagen se captura con un filtro de color azul, en este caso paso bajo de 450 nm. Por lo tanto solo se permite pasar al CCD las componentes azules y el speckle rojo se verá como falta de intensidad.

Otra imagen se capturará con un filtro paso alto que permite pasar la componente rojo. Dada esta situación, la componente azul de la franja no traspasa el filtro, por lo que se observa en la imagen como falta de intensidad.

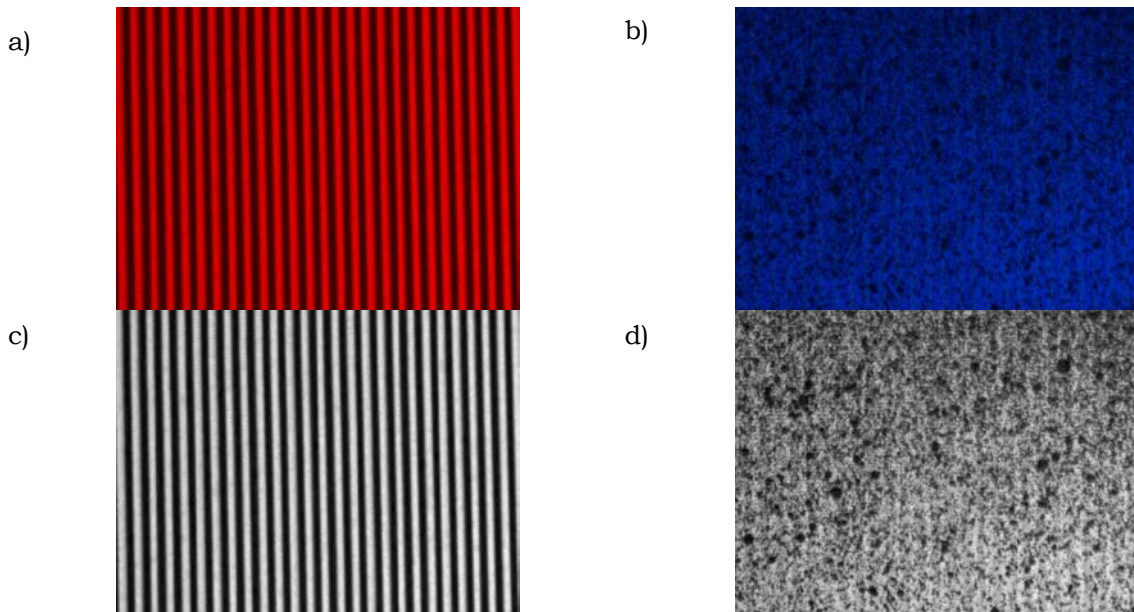


Figura 5. a) Imagen filtro fisico rojo b) imagen filtro azul c) imagen franjas escala de grises d) imagen speckle escala de grises.

El segundo método es el del filtrado digital sobre la imagen en color. En esta imagen aparecen el patrón de franjas azul y a la vez el patrón de speckle rojo. Posee la gran ventaja de no tener que detener el experimento para cambiar de lente filtrante como ocurría en el caso anterior, reduciendo además de tiempo, posibles fallos producidos por la manipulación de la lente. Tras almacenar la imagen, informáticamente se puede extraer la imagen R y B del patrón RGB. Al igual que en el caso anterior, la imagen R, registra intensidad de rojo por lo que presentara falta de intensidad donde existía azul y al contrario en la imagen B, presentando el patrón de franjas y el de speckle respectivamente.

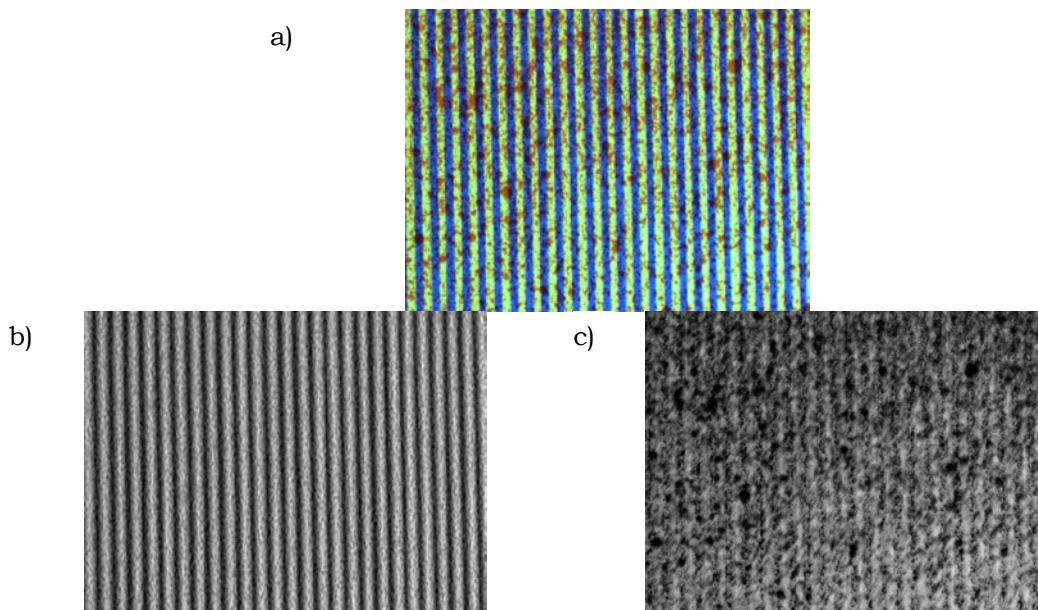


Figura 6. a) Imagen RGB b) imagen franjas escala de grises c) imagen speckle escala de grises



### 3. COMPARATIVA.

Para comparar los resultados de las imágenes del patrón de franjas se recurre a la extracción de un perfil de la imagen a la altura del píxel 200. De esta forma, la distribución de intensidad debe ser de forma senoidal. Si fuera una componente senoidal pura, la transformada de Fourier de la imagen debe presentar dos lóbulos bien definidos y libre de ruido.

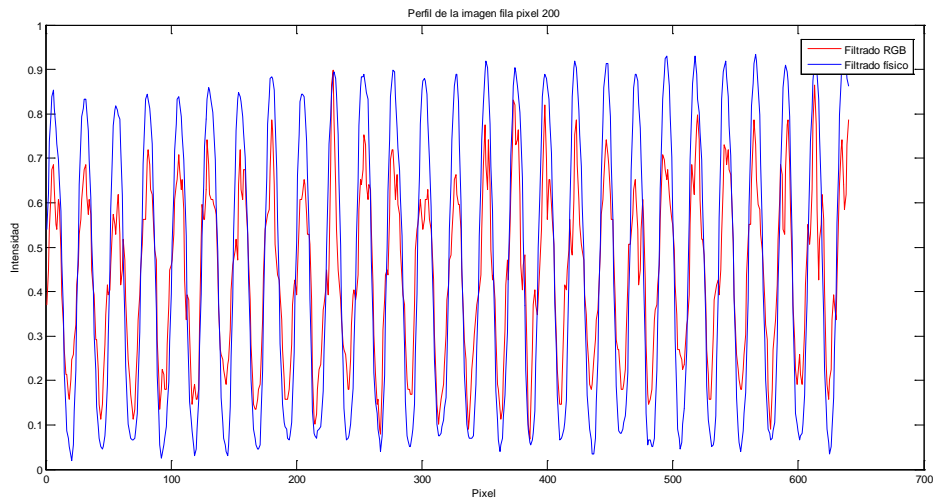


Figura 7. Comparativa distribución senoidal filtro físico (azul) filtro RGB (rojo)

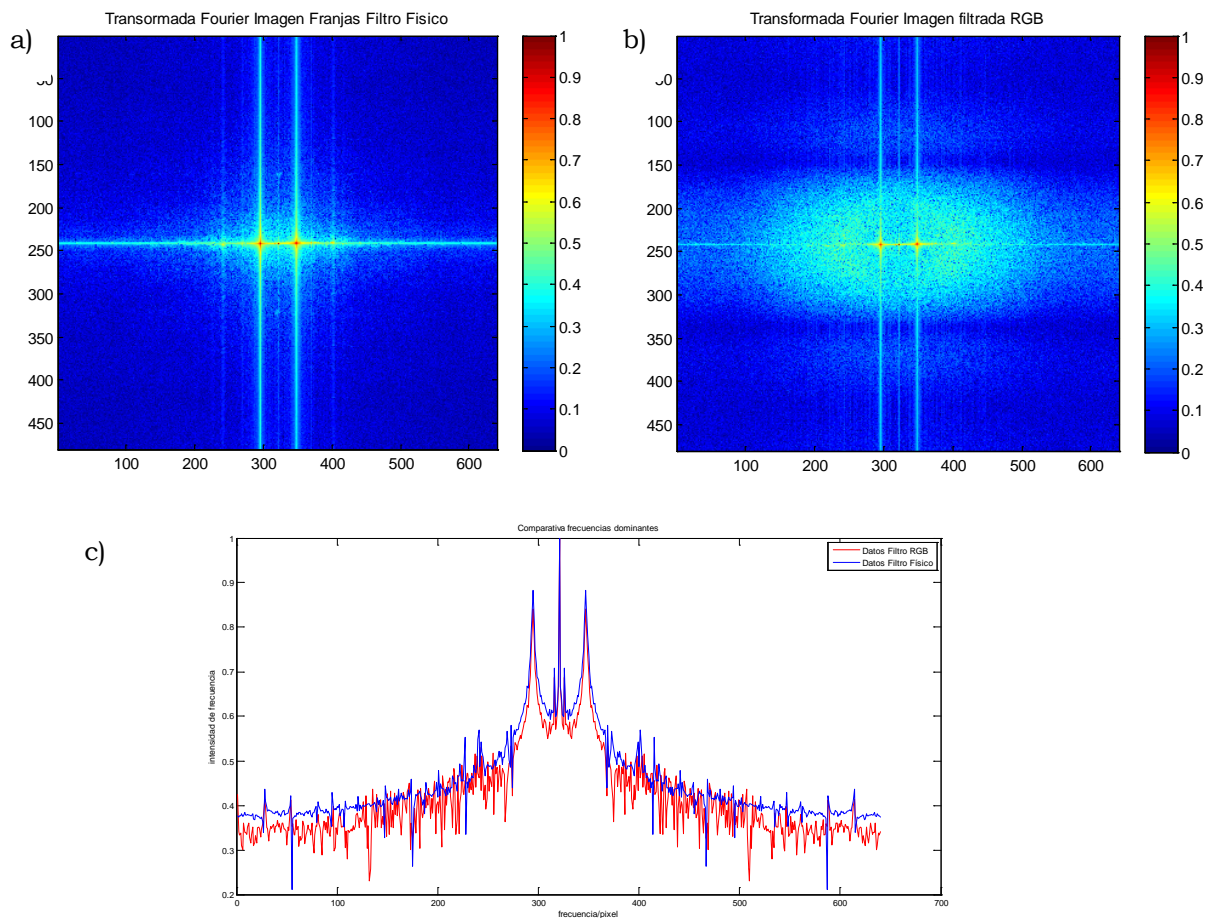


Figura 8. Comparativa imágenes de franjas en espectro de frecuencia. a) Transformada de Fourier de imagen filtrada físicamente. b) Transformada Fourier imagen filtrada por RGB. c) comparativa de perfiles de transformadas de Fourier.

A la vista de los resultados de la figura 8.a y 8.b, se puede apreciar que la imagen conseguida con el filtro físico presenta una distribución de intensidad senoidal clara y relativamente limpia, en cambio, la imagen filtrada mediante RGB presenta más ruido si bien ambas poseen la misma frecuencia y fase. Esta interpretación se hace más patente en la figura 8.c donde se observa la transformada de Fourier en dos dimensiones. Los lóbulos de la componente principal son mucho más destacados en la imagen filtrada mediante filtro físico (línea azul) que en la imagen filtrada mediante RGB (línea roja), la cual presenta más componentes debidas a ruidos.

Para comparar las imágenes del patrón de speckle conseguidas, no se puede comparar con un patrón de forma específico como en el caso de las franjas y su distribución senoidal, dado que el speckle tiene distribución de intensidad aleatoria. En este caso, dado a que no debe haber una frecuencia definida, el espectro de Fourier no debe presentar alta intensidad en la frecuencia de las franjas. Como se muestra en la figura 9, este fin es conseguido.

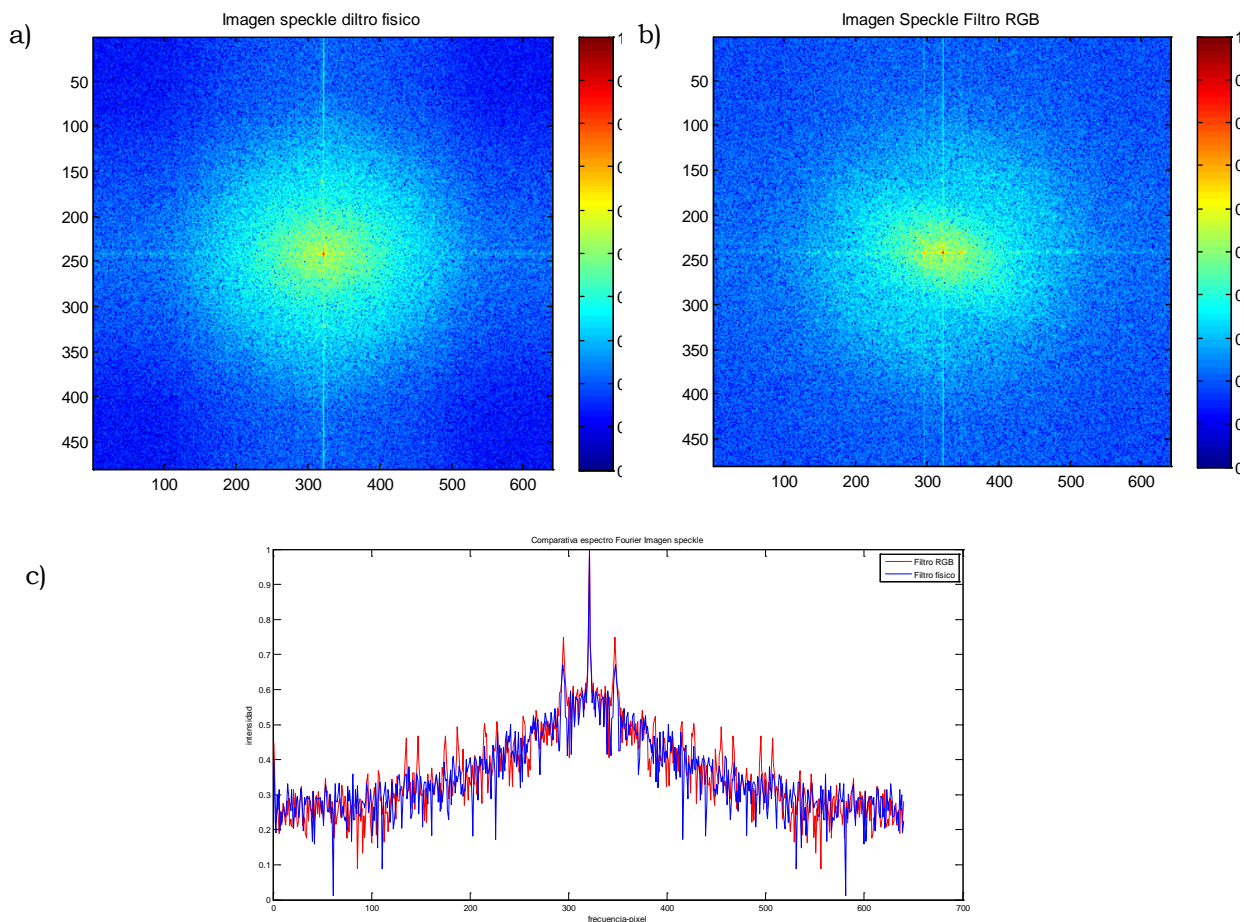


Figura 9. Comparativa imágenes de speckle en espectro de frecuencia. a) Transformada de Fourier de imagen filtrada físicamente. b) Transformada Fourier imagen filtrada por RGB. c) comparativa de perfiles de transformadas de Fourier.

Observando las transformadas de Fourier de las imágenes de speckle, se aprecia que en la imagen filtrada por filtro físico (figura 9.a) no presenta restos de la componente senoidal de las franjas, en cambio, en la imagen filtrada mediante filtro RGB (figura 9.b) sí aparece una resto de la componente senoidal de las franjas (figura 9.c).

## CONCLUSIÓN

Se ha podido comprobar que esta metodología de filtrado puede resultar muy útil y permite el uso de las técnicas de proyección de franjas y DIC 2D en un abanico de aplicaciones más amplio que cada una por separado. Los resultados del filtrado físico han resultado ser mejor

para el patrón de franjas y para el patrón de speckle ya que en el primer caso la distribución de intensidad era totalmente senoidal con bajo nivel de ruido, mientras que en el segundo caso no presentaba rastro de esa distribución senoidal, permitiendo así que el procesado de correlación pueda funcionar correctamente. En cambio el proceso de cambio de filtro físico limita el experimento a casos en los que es posible hacer este cambio.

En cambio, siendo los resultados del filtro RGB algo más ruidosos en el caso del patrón de franjas y con pequeños restos de la distribución senoidal en el patrón de speckle, puede ser utilizado en procesos dinámicos. Por lo que, aunque unos resultados del procesado de PF y DIC 2D más ruidosos, puede ser más útil y para ciertas aplicaciones. No obstante en futuros trabajos se estudiará la manera de mejorar el filtrado para poder conseguir unos patrones de franjas y speckle adecuados mejoradas con las que obtener mejores resultados.

## REFERENCIAS

- [1] G. Cloud. *Optical Methods in Experimental Mechanics*, Experimental Technique, (2002).
- [2] Bing Pan<sup>1,4</sup>, Kemao Qian<sup>2</sup>, Huimin Xie<sup>3</sup> and Anand Asundi<sup>1</sup> “Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review” *Meas. Sci. Technol.* 20 (2009)
- [3] C.J. Tay, C. Quan, Y.H. Huang, Y. Fu. *Digital image correlation for whole field out-of-plane displacement measurement using a single camera*. *Optics Communications*. 251 (2005) 23–36.
- [4] Sutton M.A., McNeill S.R., Helm J.D, Chao Y.J. “Advances in two-dimensional and three-dimensional computer vision”. *Topics in Applied Physics* .2000.Vol 77.Pp: 323-72.
- [5] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi. *Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry*, *J.Opt. Soc. Am* 72 (1982) 156-160.
- [6] M. Heredia Ortiz and E.A. Patterson. *Location and Shape Measurement Using a Portable Fringe Projection System*, Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield, Sheffield, S1 3JD, UK (2005)
- [7] T. Nam Nguyen, Jonathan M. Huntley, Richard L. Burguete, C. Russell Coggrave. *Shape and displacement measurement of discontinuous surfaces by combining fringe projection and digital image correlation*, *Optical Engineering* 50 (2011)
- [8] C. Quan, C. J. Tay, Y. H. Huang. *3-D deformation measurement using fringe projection and digital image correlation*, *Optik* 115, No. 4 (2004) 164-168
- [9] T. N. Nguyen, J. M. Huntley, R. L. Burguete, C. R. Coggrave. *Multiple-view Shape and Deformation Measurement by Combining Fringe Projection and Digital Image Correlation*, *Strain* (2011)
- [10] C. J. Tay, C. Quan, T. Wu, Y. H. Huang. *Integrated method for 3-D rigid-body displacement measurement using fringe projection*, *Opt. Eng.* 43 (2004), 1152–1159.
- [11] H. Weber, R. Lichtenberger, T. Wolf. *The Combination of Speckle Correlation and Fringe Projection for the Measurement of Dynamic 3-D Deformations of Airbag Caps*, *Solid Mechanics and Its Applications*, Volume 82 (2002), 619-626.
- [12] P. Siegmann., V. Álvarez-Fernández, F. Díaz-Garrido, E. Patterson. *A simultaneous in- and out-of-plane displacement measurement method*, *Optics Letters*, Vol 36, No 1 (2011), 10-12.
- [13] C. Mares, B. Barrientos, A. Blanco. *Measurement of transient deformation by color encoding*, *Optics Express*, Vol. 19, No. 25 (2011).