

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

*Alejandro Javier Bravo-Parra*¹

*Antonio Barcelata-Pinzón*²

Ricardo Iván Álvarez-Tamayo^{3*}

Resumen

En este trabajo se propone una optimización mecánica para generar corrimientos de fase igualmente espaciados para la extracción de la diferencia de fase existente entre una referencia y un objeto de prueba en un interferómetro de trayectoria común de doble apertura. Se muestran los cálculos de un sistema mecánico de engranajes el cual se diseñó para incrementar la precisión y control de la traslación transversal de una rejilla de difracción a fin de obtener desplazamientos equidistantes. Se muestran cálculos analíticos y simulaciones.

Palabras Clave: Diseño mecánico, interferómetro de trayectoria común, corrimiento de fase.

Abstract

In this work, the mechanical optimization for generating of equally spaced phase shifting steps is proposed for the phase difference extraction between a reference and a probe object in a double aperture common-path interferometer. Design and simulated results are shown for the gears mechanical transmission system proposed to increase the precision and control of a transverse traslation diffraction grating; in order to obtain equidistant linear displacements.

Keywords: Mechanical design, common path interferometer, phase shifting techniques.

1 Estudiante del Doctorado en Ingeniería Mecatrónica – Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, alejandrojavier.bravo@upaep.edu.mx

2 Profesor Investigador de la División Mecatrónica – Universidad Tecnológica de Puebla, antonio.barcelata@utpuebla.edu.mx

3 Profesor Investigador de la Facultad de Mecatrónica, Electrónica, Biónica y Aeroespacial – Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, ricardoivan.alvarez01@upaep.mx (autor de contacto)

1 Introducción

Los sistemas ópticos son ampliamente utilizados hoy en día en diversas áreas de la industria¹, medicina², arqueología³. Debido a que el uso de estos sistemas permite la cuantificación directa e indirecta de variables medibles fundamentales tales como índice de refracción, contorno, estiramiento, vibraciones mecánicas, desplazamiento entre otras⁴⁻⁷, lo cual conlleva al desarrollo de sistemas de medición, monitoreo o detección más sofisticados con la ventaja de usar un procedimiento no invasivo con la variable en cuestión. La interferometría ha resuelto diversos problemas evaluando la diferencia de fase entre dos haces luminosos^{8,9}, la cual contiene la información del parámetro a cuantificar. Para tal fin, es necesario que el sistema físico que opere al interferómetro tenga una precisión alta y que los algoritmos encargados del cómputo de los datos sean robustos, a fin de resolver factores externos de ruido e inestabilidad propios de la experimentación.

El interferómetro de trayectoria común de doble apertura (DACPI, por sus siglas en inglés) es un sistema óptico $4f$ que permite comparar la fase existente entre una ventana de referencia y una ventana que contiene un objeto de prueba¹⁰⁻¹². La información de una ventana interfiere con la otra mediante una rejilla de difracción considerando las dimensiones y distancias adecuadas de las mismas¹⁰. Este patrón de interferencia es capturado por un sistema de visión (cámara CCD) el cual es enviado a un sistema de cómputo para ser procesado digitalmente. La rejilla se traslada transversalmente obteniendo así un cambio de fase entre cada patrón. Dicho cambio de fase es calculado a través el uso de un algoritmo que permite posteriormente calcular la diferencia existente entre los objetos y asociar éste cambio con alguna variable física. El DACPI tiene como

característica principal que ambos haces de luz viajan a través de la misma trayectoria, lo cual lo convierte en un interferómetro muy robusto y poco sensible al ruido.

Existen diversos algoritmos computacionales utilizados para analizar los patrones de interferencia obtenidos los cuales difieren entre sí en los parámetros a considerar para realizar la extracción de la fase como lo son: el número de franjas, la equidistancia de los cambios de fase, el ruido y/o la complejidad de los patrones, entre otros.

Los métodos para operar mecánicamente los interferómetros utilizan avanzados sistemas de control basados en drivers y motores piezoeléctricos¹³⁻¹⁵ los cuales dotan de una alta sensibilidad de respuesta, pero involucran un costo elevado, equipamiento especial y calibración exhaustiva. En este sentido, a través del diseño mecánico se pueden construir sistemas que permitan obtener precisiones cercanas a los estándares convencionales, con la ventaja de reducir los costos, así como permitir el ajuste a los requerimientos específicos de la aplicación que se persigue.

El avance de la tecnología en el diseño CAD/CAM, así como en la impresión 3D ha permitido construir piezas que desempeñan funciones específicas dentro de un sistema, además de contar con la ventaja de poder simular los sistemas antes de fabricarlos.

En este trabajo se plantea optimizar un sistema electromecánico de traslación de rejilla en un DACPI con la finalidad de obtener corrimientos de fase igualmente espaciados para tener la posibilidad de aplicar algoritmos que mejoren la precisión al aplicar la extracción de la diferencia de fase entre un objeto de prueba y una referencia.

2 Principio de operación del DACPI

El DACPI es un sistema $4f$ telecéntrico formador de imágenes formado por dos ventanas ubicadas en el plano objeto, una rejilla de difracción ubicada en el plano de Fourier y un sistema

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

de captura de imagen en el plano imagen. Un haz de luz colimado viaja paralelamente a través de las aperturas para coincidir mediante una lente en una rejilla de Ronchi. La elección del tamaño y separación de las ventanas permiten que los haces interfieran formando patrones de franjas las cuales son capturados por una CCD mediante un arreglo óptico. Las franjas de interferencia aparecen debido a que una de las ventanas se coloca un objeto transparente de prueba mientras que en la otra no se coloca ningún objeto. El arreglo se muestra en la figura 1.

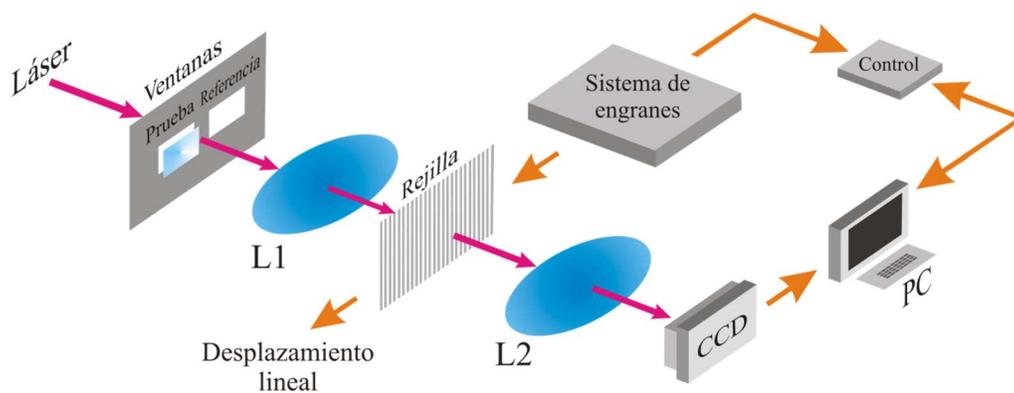


Fig. 1 Esquemático del interferómetro de trayectoria común (DACPI)

De esta manera mientras que por una ventana el haz viaja por el aire, en la otra debe pasar a través de un objeto de prueba generando un patrón de interferencia que muestra la diferencia de fase existente entre el objeto y una referencia, matemáticamente, la intensidad de dicho patrón puede ser descrita como ^{16,17}:

$$I_{0j}(x, y) = I_B(x, y) + I_M(x, y)\cos(\phi(x, y) + \alpha_j), \quad (1)$$

donde $I_{0j}(x, y)$ es la intensidad luminosa debida a la superposición de los campos del orden 0 y orden 1 de los campos de referencia y de prueba, los términos $I_B(x, y)$ y $I_M(x, y)$ se conocen como luces de fondo y de modulación respectivamente mientras que $\phi(x, y) = \phi_P(x, y) - \phi_R(x, y)$ es la diferencia de fase entre el objeto de prueba $\phi_P(x, y)$ y la referencia $\phi_R(x, y)$. Esta diferencia de fase puede relacionarse con el cambio de una variable física como lo puede ser

torsión, estiramiento, índice de refracción, entre otros. El término α_j representa la fase añadida al patrón. Para calcular analíticamente el valor de la diferencia de fase existen métodos como lo son el método de la transformada de Fourier¹⁸ o el método del corrimiento de fase¹⁹. El método de la transformada de Fourier requiere un solo patrón de interferencia, aunque éste debe de tener un nivel mínimo de ruido y un filtraje adecuado mientras que el método del corrimiento de fase, que es el que utilizaremos, añade fases conocidas o no al patrón de interferencia y utiliza algoritmos para conocer la fase original llevando su tarea a cabo aun en presencia de niveles moderados de ruido en la señal. El incremento de la fase α_j en el patrón original se realizará mediante el desplazamiento transversal al eje óptico de la rejilla^{10,16}, de tal manera que se obtendrán tantos patrones como desplazamientos se realicen. Tal incremento puede calcularse como:

$$\alpha_j = 2\pi \frac{u_d}{u_p} \quad (2)$$

donde u_p es el periodo de la rejilla y u_d es el desplazamiento de la misma.

Se han reportado diversos algoritmos utilizados en el corrimiento de fase para determinar $\phi(x, y)$ los cuales utilizan típicamente tres o cuatro corrimientos igualmente espaciados a fin de simplificar el cálculo y obtener una alta precisión¹⁹. En fechas recientes se han implementado con éxito los algoritmos de autocalibración²⁰⁻²² cuya ventaja estriba en que los corrimientos de fases pueden ser desiguales, aunque el número de franjas requerido para tener precisiones aceptables es sensiblemente mayor que en algoritmos con igual espaciado entre fases.

Usualmente, el desplazamiento de la rejilla para obtener corrimientos de fase en un DACPI se llevaba a cabo de manera manual¹⁶, lo que generaba errores humanos sistemáticos. Posteriormente se reportó la implementación de un sistema electromecánico al mismo

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

interferómetro obteniendo una disminución poco significativa en el error al intentar obtener corrimientos de fase igualmente espaciados²³.

Lo que se pretende en este trabajo es implementar una transmisión mecánica a través de un par de engranes, que permita obtener corrimientos igualmente espaciados con el mínimo de error.

3 Diseño del sistema mecánico para corrimiento de fase.

Para el diseño del sistema mecánico para el desplazamiento automático de la rejilla de Ronchi, se optó por un sistema de transmisión de engranes acoplado al motor a pasos. De esta manera, se transmite el desplazamiento angular de cada paso del motor como un desplazamiento lineal con intervalos de distancia igualmente espaciados en la base micrométrica, como se esquematiza en la figura 2.

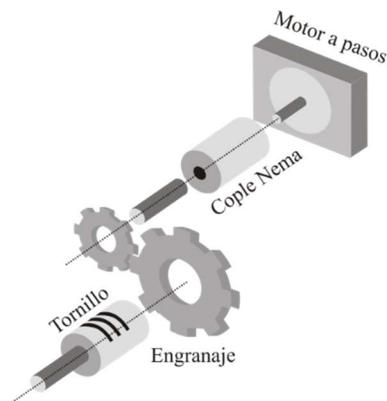


Fig. 2 Acoplamiento del sistema de engranes a la base del tornillo micrométrico

Para este fin, se utilizó la técnica de modelado de engranes rectos con perfil de involuta para el diseño de los dientes del par de engranes que forman el sistema de transmisión (véase figura 1).

El cálculo del sistema de engranes y del diseño de los elementos auxiliares está basado en el dimensionamiento del espacio disponible para el montaje del sistema mecánico en la base del interferómetro y su acoplamiento al eje del motor. De acuerdo a la medición inicial se cuenta con

15 mm de espacio transversal para asegurar el giro libre del tornillo milimétrico. Se propuso una relación de transmisión par 1/5 y el diseño a partir de un ángulo de presión estándar de 20°. De esta forma, el número de dientes de corona y piñón corresponden a 125 y 25 dientes, respectivamente, para un módulo de 0.8. A partir de estos datos iniciales, se calcularon las dimensiones necesarias para el diseño de ambos engranes. Los valores utilizados para el diseño se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Dimensiones de los engranes.

Distancia centro par	60	
Ángulo de presión	20°	
Módulo	0.8	
	Corona	Piñón
Número de dientes	125	25
Diámetro de paso	100 mm	20 mm
Addendum	0.8 mm	
Dedendum	0.9256 mm	
Profundidad	1.7256 mm	
Holgura	0.1256 mm	
Diámetro externo	101.6 mm	21.6 mm
Diámetro base	98.1488 mm	18.1488 mm
Circunferencia base	93.9692 mm	18.7938 mm
Paso circunferencial	2.51327 mm	
Espesor circular del diente	1.25663 mm	

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

Espesor de la cabeza del diente	0.80394 mm	0.81973 mm
Profundidad de trabajo	1.6 mm	

Debido a la particularidad de considerar un módulo con paso fraccionario, el diámetro de paso y el diámetro de base fueron ajustados a valores aproximadamente iguales para poder trazar las curvas de involuta para el perfil del diente. El sistema de engranes y la estructura de soporte fue diseñado a través del software de diseño asistido por computadora (CAD) CREO. La figura 3 muestra el diseño del perfil de diente en CREO, basado en el trazo de curvas de involuta.

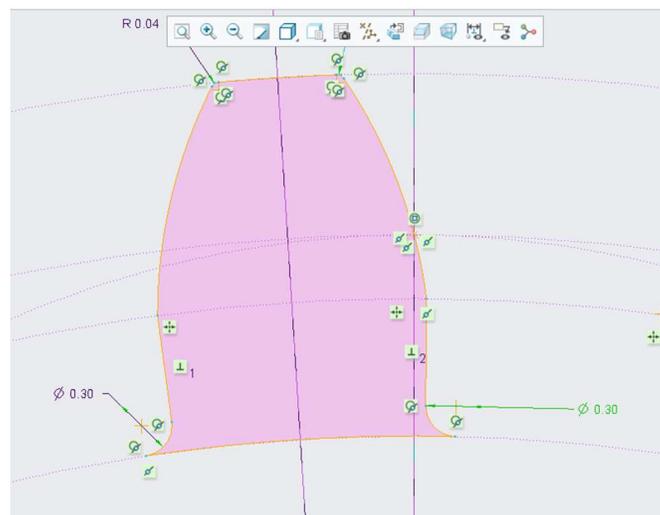


Fig. 3 Diseño del perfil de diente por curva de involuta en CREO.

Considerando que se trata de un sistema mecánico de bajo costo, se establecieron diferentes estrategias para la optimización de recursos. Esto se aplica en la reducción del peso del engranaje. La solución en impresiones 3D es de bajo costo en relación a la manufactura por maquinado de piezas con torno, además, se tiene la ventaja de la disminución del peso del engrane por la elección del material plástico. En la actualidad, los nuevos materiales usados en la industria de impresión 3D han mejorado sus propiedades mecánicas. Para el diseño propuesto, el material seleccionado es Polylactic Acid (PLA), que es un material biodegradable comúnmente

utilizado para impresión 3D. Además de la elección de material, se reduce el costo del sistema a través del diseño de piezas con poco material, para su posible proceso de fabricación, por lo que se diseñaron engranes con orificios. Con la finalidad de mantener la resistencia mecánica de los engranes, se aplicó análisis por elemento finito que permitió elegir la remoción de material en las áreas de bajo nivel de estrés. Para la solución propuesta se utiliza el módulo de flexión del PLA de 3150 Mpa. Adicionalmente, para validar que la solución propuesta no se fracture fácilmente se utiliza un esfuerzo de tracción a la ruptura de 45.6 MPa. Este esfuerzo da como resultado la resistencia del engrane en operación, con la finalidad de conocer rápidamente si es factible el uso de este diseño.

La figura 4 muestra el diseño final de los engranes utilizados para el sistema de transmisión de par. Se puede apreciar la remoción de material en cuatro porciones del cuerpo del engrane.

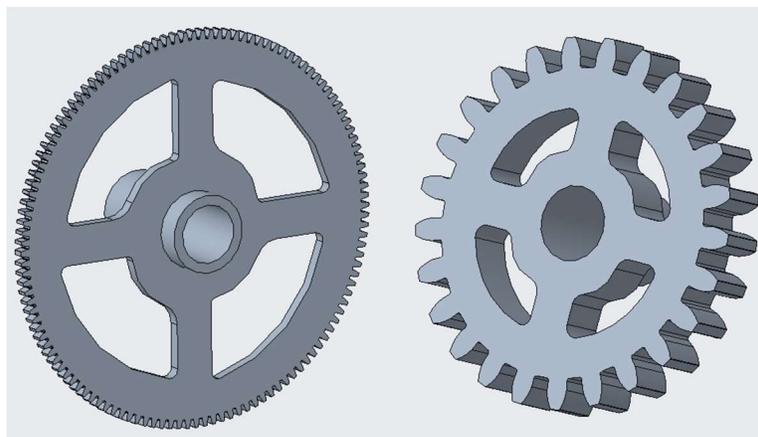


Fig. 4 Diseño CAD de los engranes: (a) Corona, (b) Piñón.

Para la validación del diseño por estudio de esfuerzos se aplicó fuerza en uno de los dientes con fijación de componente en el centro. De esta forma, se simula el par de inicio en la generación de movimiento provocado por el eje del motor a pasos (Nema 17), como se muestra en la figura 5. Las fuerzas aplicadas sobre el diente se muestran como vectores en color anaranjado y las restricciones de movimiento como marcas en color morado sobre el centro del piñón.

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

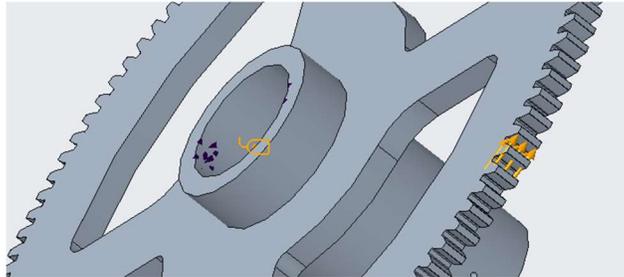


Fig. 5 Posicionamiento de aplicación de fuerza y restricciones de movimiento para el piñón.

Para el análisis, se consideró un esfuerzo de 10 lb-in, cuyo valor constituye un margen de 5 veces el par producido por el motor de 2 lb-in. Lo anterior, con la finalidad de mejorar el factor de seguridad y el posible cambio de motor en el diseño.

El resultado del análisis muestra la localización de las áreas con deformación sobre la pieza y una escala en colores para su magnitud. Como muestra el diseño del engrane con orificios de la figura 6(a), se puede observar una zona reducida sobre el área de la base del diente en la que se tiene el mayor estrés que podría provocar una posible fractura. Sin embargo, la magnitud del esfuerzo y la superficie de riesgo no es significativa para considerarse como un problema de diseño, por lo que considerada como una marca superficial que no afecta la integridad de la pieza. También se observa que la deformación en el centro del piñón no tiene afectación, por lo que tampoco implica un factor de riesgo en el diseño. La figura 6(b) muestra el análisis de esfuerzos sobre el piñón sin orificios. En comparación con el piñón con huecos, para este caso se observa que el estrés es acumulado en los dientes del engrane, como lo indican las áreas rojas en sus crestas. Lo anterior, se atribuye a la poca absorción de fuerza a lo largo de un elemento sólido, que se traduce en menor amortiguamiento a la transmisión de par. Los radios de los huecos agregados al diseño del engrane transmisor permiten disipar el esfuerzo aplicado. Como se puede apreciar en las gráficas de estrés Von Mises, la aplicación de esfuerzo provoca un

desplazamiento del diente del engrane, cuya magnitud es de 0.084 mm, lo cual no crea una fisura o fractura en el diente. Para el material PLA+ elegido, se tiene un módulo de Von Mises de la corona de 34.5936 MPa y del piñón de 20.071, y comparándolo con el valor de esfuerzo a la fractura del material 45.6 MPa tendríamos un factor de seguridad de 1.318 y 2.271, respectivamente.

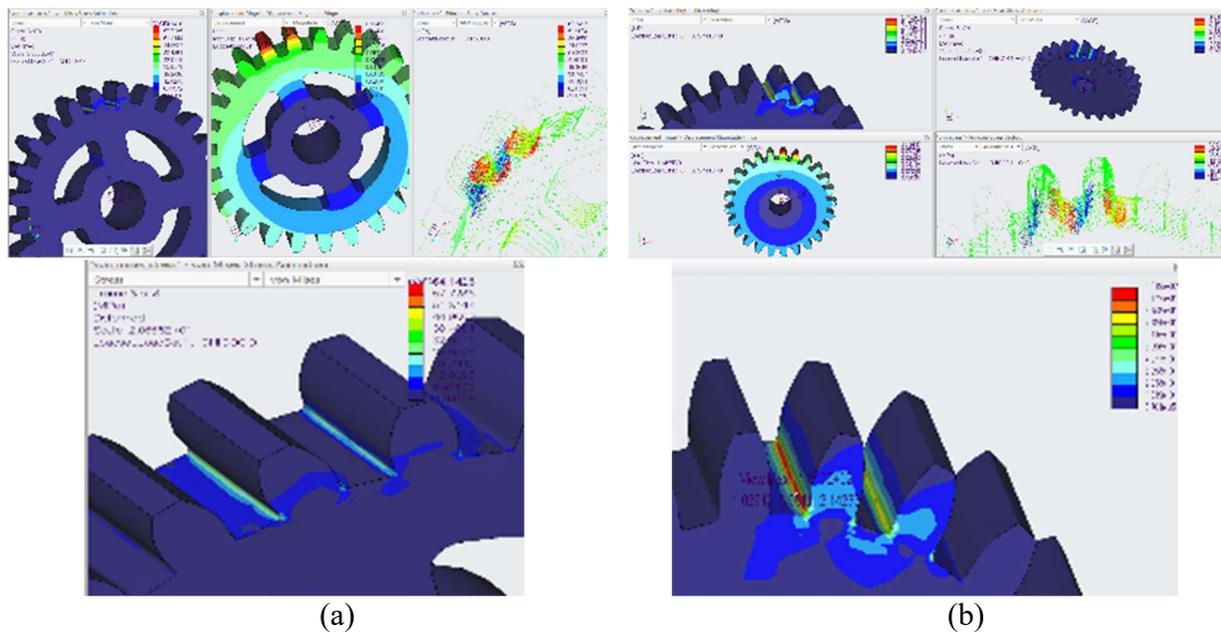


Fig. 6 Análisis de esfuerzo sobre el piñón: (a) diseño con orificios, (b) diseño sólido.

Adicionalmente, como el sistema será utilizado en un interferómetro, se requieren mejoras para evitar vibraciones disminuyendo el efecto de la gravedad, que compromete una captura adecuada de los interferogramas para la obtención de fase. Para este fin, se incluye una modificación en el diseño de la corona, para alojar el tornillo de avance para el desplazamiento de la base óptica micrométrica. Lo anterior, a través del acoplamiento con mayor profundidad (y área) del tornillo micrométrico en el centro de la corona. Como consecuencia, se obtiene una transferencia de movimiento con menor vibración. El diseño del acoplamiento propuesto se muestra en la figura 7(a), mientras que la figura 7(b) es un esquemático en el que se presenta el ensamble del tornillo

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

(a) dentro de la corona (b). Como se puede observar, adicionalmente, se integraron elementos de sujeción (c) que permiten mantener alineación sobre el eje de rotación cuando un par alto (de inicio de giro) es transmitido a la corona. De esta forma, el diseño del sistema prevé el uso de dos elementos de sujeción “anti-cabeceos” que contendrán bolas de rodamiento de acero (balines) 3/16” que permitirán reducir la fricción entre la corona/piñón y el sujetador. El anclaje de los sujetadores es a la mesa óptica donde el interferómetro es implementado, mediante tornillos estandarizados. La figura 7(c) muestra el ensamble del diseño del sistema de transmisión mecánico propuesto. Como se muestra, se tienen dos elementos de sujeción (d) y (e). Dichos elementos anti-cabeceo tienen un diseño que permite el ajuste de altura para garantizar la correcta alineación con el eje de rotación y acoplamiento entre piñón y corona.

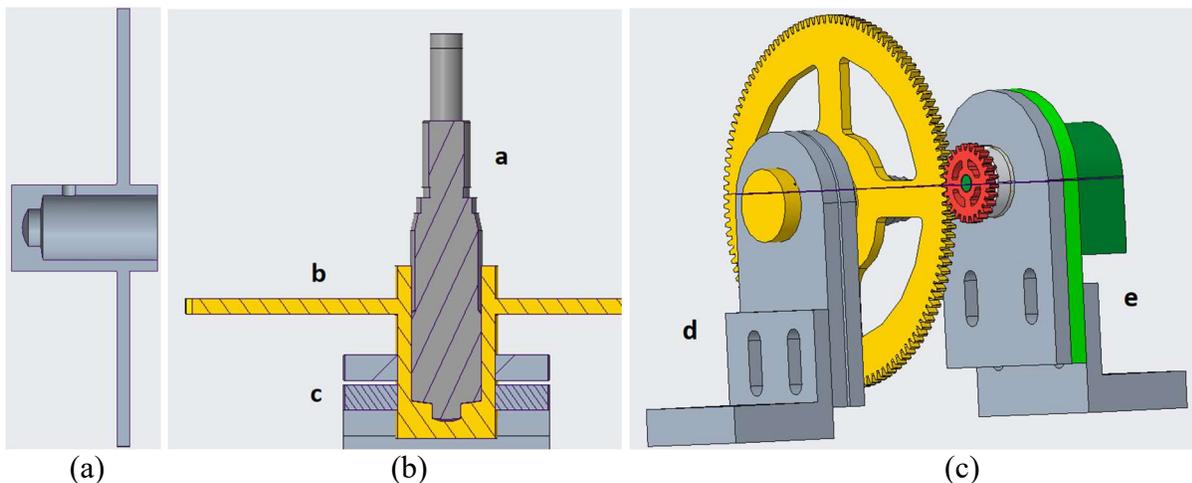


Fig. 7 Diseño del sistema de transmisión: (a) Diseño de la corona con alojamiento del tornillo; (a) Ensamble del tornillo micrométrico dentro de la corona (c) Ensamble total del sistema.

Los elementos anti-cabeceo también permiten el giro de los elementos rotores alineados en altura al eje de rotación, minimizando el desbalance por acción de las fuerzas concentradas en el engrane por peso de los componentes, afectados por la acción de la gravedad (ver figura 8(a)). Los balines giran libremente dentro de las placas que las sujetan ya que en el diseño se propuso

una holgura de 0.05mm a balines 3/16". El diseño contempla dos acoplamientos sobre las placas de los elementos anti-cabeceo: uno para la corona acoplada al tornillo micrométrico y el otro para el piñón acoplado al eje del motor a pasos (coupler nema 17). Es importante mencionar que la propuesta de diseño evita el cabeceo, pero, a su vez, incrementa el par de resistencia para inicio de giro debido al peso. La intención en la configuración es absorber y centrar ese peso extra con la calibración inicial del eje de rotación, a través del ajuste de altura en los elementos de sujeción como se esquematiza en la figura 8(b).

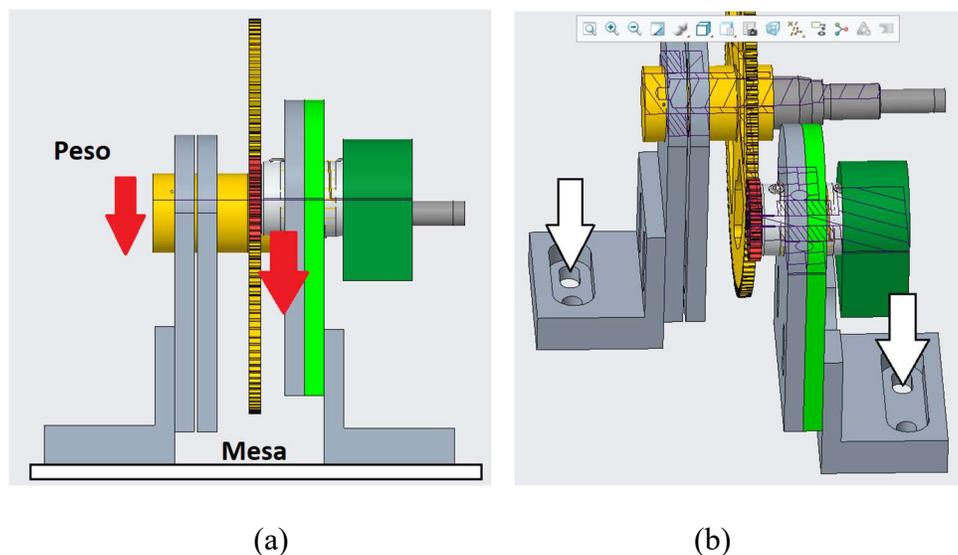


Fig. 8 Esquemáticos de montaje del sistema de transmisión: (a) Ajuste de alturas alineadas al eje de rotación, (b) Calibración inicial con acoplamiento de motor a pasos (al piñón) y tornillo micrométrico (a la corona).

4 Simulación del error introducido en el corrimiento de fase

En el caso de la captura de interferogramas secuenciales a través del DACPI propuesto, permite el cálculo de la fase envuelta del objeto en la ventana de prueba. Como se mencionó anteriormente, los algoritmos utilizados para la obtención de la fase envuelta típicamente

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

requieren la captura de interferogramas con corrimiento de fase igualmente espaciados. Este corrimiento responde directamente al movimiento angular introducido desde el motor a pasos en el sistema mecánico propuesto, que genera un desplazamiento lineal en la base micrométrica donde está montada la rejilla. Así, el error de movimiento introducido desde el sistema mecánico, se traduce en un error de fase entre los interferogramas capturados. En este sentido, el máximo error mecánico introducido al sistema es consecuencia de la holgura lateral (backlash) en el acoplamiento de los dientes de los engranes del sistema de transmisión. Esta holgura es la magnitud por la cual la anchura del valle de un engrane es superior al espesor del diente acoplado en el otro engrane. a partir de este juego introducido al movimiento angular en cada paso del motor, se puede estimar el error máximo teórico esperado en el corrimiento de fase entre dos capturas de interferogramas del DACPI. El cálculo de la holgura lateral de dientes piñón-corona en contacto de acuerdo al acoplamiento óptimo del sistema de engranes, se puede estimar a partir de²⁴

$$j_{bt} = \theta_{b2} r_{b2} \frac{\pi}{180}, \quad (3)$$

donde j_{bt} es la holgura lateral (backslash), θ_{b2} es la holgura angular entre corona y piñón y r_{b2} el radio de la corona. Considerando $j_{bt} = 0.06459$ mm (por diseño) y $r_{b2} = 50$ mm podemos obtener una holgura angular θ_{b2} de 0.074° por paso.

Para realizar la simulación, fueron consideradas 47 capturas experimentales reportadas en 2021 por nuestro grupo de trabajo²³ para lo cual se consideró un sistema de engranes de 4 a 1 sin optimización de cabeceo, considerando una rejilla con periodo $u_p = 2\mu\text{m}$, un giro de motor a pasos de 0.45° y un desplazamiento resultante de $0.79375 \mu\text{m}$ por paso lo que genera un corrimiento teórico de fase equivalente a 2.4936 radianes. El sistema de optimización de

engranaje propuesto introduciría un desplazamiento angular máximo en el peor de los casos de $\theta_{b2}/2 \approx \pm 0.037^\circ$ lo que introducirá un desplazamiento lineal del tornillo micrométrico de $\pm 0.1305 \mu\text{m}$ y un corrimiento de fase adicional máximo de ± 0.41 radianes lo que, añadido al valor teórico calculado, produciría variaciones de fase que oscilarán entre 2.0835 y 2.9037 radianes considerando el escenario menos favorecedor. Se compararon los resultados experimentales (sin optimización) y los resultados teóricos que se obtendrían a partir de la implementación del diseño mecánico. Para obtener estos datos, se generaron valores de fase aleatorios comprendidos entre 2.0835 y 2.9037 radianes y se calculó el promedio, la desviación estándar, el porcentaje de error, BIAS y coeficiente de variación como se aprecia en la tabla 2.

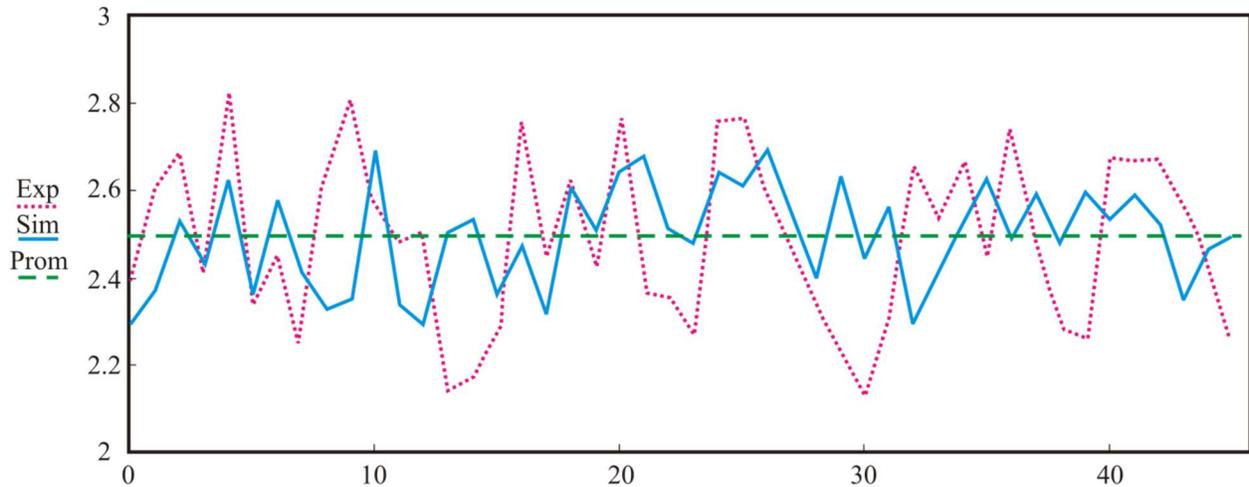
Tabla 2 Comparativa estadística entre resultados experimentales y optimización teórica.

Condición (engranes 4 a 1)	Desplazamiento (μm)	Fase (radianes)	Promedio (radianes)	Desviación estándar	Error (%)	BIAS (radianes)	Coefficiente de variación (%)
No optimizado	0.7937	2.4936	2.4829	0.1999	0.43	0.0106	8.05
Optimizado	entre 0.6632 y 0.9242	entre 2.0835 y 2.9037	2.49357	0.117	0.002	0.00007	4.698

La tabla 2 muestra que el porcentaje de error de la optimización teórica es menor, así como también se observa que la desviación estándar disminuye, la diferencia entre el valor promedio y el valor de referencia (BIAS) disminuye en un orden de magnitud con respecto a lo obtenido experimentalmente mientras que el coeficiente de variación es de aproximadamente la mitad. Estos datos nos indican tanto que la dispersión de los datos como el error disminuye con la optimización mecánica lo cual se interpreta como una mejoría en la búsqueda de obtener pasos equidistantes. Es importante mencionar que los datos simulados muestran los valores de fase

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

obtenidos bajo la peor condición y aun así optimizan los resultados obtenidos de manera experimental.



En la figura 9 se aprecia que los datos obtenidos de manera experimental (línea punteada rosa) para el arreglo no optimizado, presentan mayor dispersión que en el caso de los datos simulados para el arreglo actual (línea azul), sin perder de vista que la simulación considera un caso extremo de holgura mecánica. Como consecuencia, se puede prever una disminución significativamente mayor que la mostrada en la figura 9, cuando el arreglo optimizado permita obtener resultados experimentales. Lo anterior, tomando en cuenta que la holgura lateral máxima, solamente se podría presentar en el paso inicial del motor. Para los pasos subsiguientes, la holgura lateral tendría que ser mínima, considerando que los pasos se generan en un mismo sentido de giro.

Referencias

1. Sabella R, Iovanna P, Bottari G, Cavaliere F. Optical transport for Industry 4.0. *J Opt Commun Netw.* 2020;12(8):264-276. doi:10.1364/JOCN.390701

2. Bally G von, Schmidthaus W, Sakowski H, Mette. W. Gradient-index optical systems in holographic endoscopy. *Appl Opt.* 1984;23(11):1725.
3. Liang H, Peric B, Hughes M, Podoleanu AG, Spring M, Roehrs S. Optical Coherence Tomography in archaeological and conservation science - a new emerging field. *Ist Canterbury Work Opt Coherence Tomogr Adapt Opt.* 2008;7139:1-9.
doi:10.1117/12.819499
4. Norgia M, Donati S. A Displacement-Measuring Instrument Utilizing Self-Mixing Interferometry. *IEEE Trans Instrum Meas.* 2003;52(6):1765-1770.
doi:10.1109/TIM.2003.820451
5. Kholkin AL, Wüthrich C, Taylor D V., Setter N. Interferometric measurements of electric field-induced displacements in piezoelectric thin films. *Rev Sci Instrum.* 1996;67(5):1935-1941. doi:10.1063/1.1147000
6. Shakher C, Nirala AK. Measurement of temperature using speckle shearing interferometry. *Appl Opt.* 1994;33(11):2125-2127.
7. Sharma S, Sheoran G, Shakher C. Digital holographic interferometry for measurement of temperature in axisymmetric flames. *Appl Opt.* 2012;51(16):3228-3235.
doi:10.1364/AO.51.003228
8. Mee R, Dontsov D, Langlotz E. Interferometric device for the in-process measurement of diameter variation in the manufacture of ultraprecise spheres. *Meas Sci Technol.* 2021;32(7). doi:10.1088/1361-6501/abe81c
9. Kohno T, Matsumoto D, Yazawa T, Uda Y. Radial shearing interferometer for in-process measurement of diamond turning. *OptEng.* 2000;42:701-707.
10. Meneses-Fabian C, Rodriguez-Zurita G, Vazquez-Castillo JF, Robledo-Sanchez C,

Optimización teórica de sistema electromecánico para obtención de fase para un interferómetro de trayectoria común

- Arrizón V. Common-path phase-shifting interferometer with binary grating. *Opt Commun.* 2006;264(1):13-17. doi:10.1016/j.optcom.2006.02.024
11. Meneses-Fabian C, Rodriguez-Zurita G, Arrizón V. Optical tomography of transparent objects with phase-shifting interferometry and stepwise-shifted Ronchi ruling. *J Opt Soc Am A.* 2006;23(2):298. doi:10.1364/josaa.23.000298
 12. Mico V, Zalevsky Z, García J. Superresolution optical system by common-path interferometry. *Opt Express.* 2006;14(12):5168. doi:10.1364/OE.14.005168
 13. Bruno L, Poggialini A, Felice G. Design and calibration of a piezoelectric actuator for interferometric applications. *Opt Lasers Eng.* 2007;45(12):1148-1156. doi:10.1016/j.optlaseng.2007.06.004
 14. Sokkar TZN, El-Farahaty KA, El-Bakary MA, Omar EZ, Hamza AA. Optical birefringence and molecular orientation of crazed fibres utilizing the phase shifting interferometric technique. *Opt Laser Technol.* 2017;94:208-216. doi:10.1016/j.optlastec.2017.03.037
 15. Nguyen TD, Duong QA, Higuchi M, Vu TT, Wei D, Aketagawa M. 19-Picometer Mechanical Step Displacement Measurement Using Heterodyne Interferometer With Phase-Locked Loop and Piezoelectric Driving Flexure-Stage. *Sensors Actuators, A Phys.* 2020;304:111880. doi:10.1016/j.sna.2020.111880
 16. Barcelata-Pinzon A, Meneses-Fabian C, Moreno-Alvarez L, Pastrana-Sanchez R. Common-path speckle interferometer for phase objects studies. *Opt Commun.* 2013;304(1):153-157. doi:10.1016/j.optcom.2013.04.066
 17. Arrizón V, Sánchez-de-la-Llave D. Common-path interferometry with one-dimensional periodic filters. *Opt Lett.* 2004;29(2):141. doi:10.1364/ol.29.000141

18. Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. 1982;72(1):156-160.
19. Creath K. Phase-shifting speckle interferometry. *Appl Opt*. 1985;24(18):3053.
doi:10.1364/ao.24.003053
20. Gomez-Conde JC, Meneses-Fabian C. Real-time phase step measurement using the volume enclosed by a surface algorithm in self-calibrating phase-shifting interferometry. *Meas J Int Meas Confed*. 2020;153(December):107412.
doi:10.1016/j.measurement.2019.107412
21. Gomez-Conde JC, Meneses-Fabian C. Real-time measurements of phase steps out-of-range $(0,2\pi)$ by a dynamic self-calibrating generalized phase-shifting algorithm. *Opt Lasers Eng*. 2021;140(May):106543. doi:10.1016/j.optlaseng.2021.106543
22. Meneses-Fabian C. Self-calibrating generalized phase-shifting interferometry of three phase-steps based on geometric concept of volume enclosed by a surface. *J Opt (United Kingdom)*. 2016;18(12). doi:10.1088/2040-8978/18/12/125703
23. Barcelata-Pinzon A, Alvarez-Tamayo RI, Prieto-Cortés P. A Real-Time Automated System for Dual-Aperture Common-Path Interferometer Phase-Shifting. *Appl Sci*. 2021;11:1-10.
24. Li M, Liang R, Zhang Y, Peng C, Mu D, Wan Z. On-line measurement method of transmission backlash based on angular velocity and double-end angular position information. *Meas Control (United Kingdom)*. 2021;54(1-2):65-72.
doi:10.1177/0020294020973252