

OPTIMIZACIÓN DE MONTURAS MECÁNICAS DE ESPEJOS PARA CONDICIONES ESPECÍFICAS A PARTIR DE UNA RECONSTRUCCIÓN UTILIZANDO POLINOMIOS DE ZERNIKE

Martín Rodríguez-Vega^{*†}, Anderson Bermúdez*, María Isabel Rúa*, Luisa Fernanda Benavides*, René Restrepo*

** Grupo de Óptica Aplicada, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad EAFIT, Carrera 49 N° 7 Sur - 50, Medellín, Colombia.*

Recibido 26 Noviembre 2013; aceptado 22 Julio 2014

Disponible en línea: 18 Diciembre 2014

Resumen: En este trabajo se muestra una solución optimizada al diseño mecánico de una montura, partiendo de condiciones termo-elásticas determinadas. Se compararon algunas de las monturas ópticas usadas comúnmente para espejos en instrumentación astrofísica, y se realizó un análisis en elementos finitos para obtener el perfil deformado de los espejos en cada uno de los montajes. Una vez obtenido el perfil de los espejos se reconstruyó, a partir de polinomios de Zernike, las aberraciones del frente de onda asociadas a cada polinomio. Se seleccionó la montura en la cual los coeficientes de cada polinomio minimizaban las aberraciones.

Palabras clave: Aberraciones Ópticas, Polinomios de Zernike, Opto-mecánica

OPTIMIZATION OF MECHANICAL MOUNTS FOR MIRRORS FOR SPECIFIC CONDITIONS BASED ON A RECONSTRUCTION BY USING ZERNIKE POLYNOMIALS

Abstract: This paper shows an optimized solution to the mechanical design of a mount for specific thermo-elastic conditions. Some optical mounts for mirrors commonly used in astrophysical instrumentation were compared and a finite element analysis was realized to obtain the deformation profile for the mirrors for each of the mounts. Once obtained the deformation profile, Zernike polynomials were used to reconstruct the wavefront aberrations associated to each of the polynomials. According to the RMSE and the coefficients of the polynomials, the best mount was selected.

Keywords: Optical Aberrations, Zernike Polynomials, Opto-mechanics

1. INTRODUCCIÓN

En la instrumentación astronómica y astrofísica, es indispensable tener sistemas ópticos que produzcan una buena calidad de imagen y que

permitan realizar observaciones precisas y confiables del objeto de estudio ([Sanchez-Blanco et al, 2007](#)) ([Bonet, 1999](#)). De tal manera que los sistemas mecánicos utilizados aseguren que las deformaciones que estos causan en los elementos

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. (+574) 2619500 ext. 9321.

E-mail: mrodr39@eafit.edu.co (Martín Rodríguez).

ópticos no induzcan aberraciones que interfieran con las observaciones requeridas ([Doyle et al., 2002](#)).

Las aberraciones del frente de onda están normalmente asociadas a los distintos polinomios de Zernike, por lo que estos son ampliamente utilizados para la descomposición de un frente de onda en términos de sus aberraciones. Los polinomios cumplen además las propiedades de ortogonalidad dentro del círculo unitario, sin embargo, en el presente trabajo se analizaron espejos hexagonales, por lo que se aplicó un método de ortogonalización para la nueva geometría ([Dai y Mahajan, 2007a](#)).

En la sección 2 de este artículo se discute el procedimiento seguido, presentando los montajes y pruebas utilizados, y se explica la información extraída de los resultados. Posteriormente, la sección 3 contiene los resultados obtenidos para cada uno de los montajes en cada una de las pruebas discutidas en la sección 2, y se presentan en tablas los resultados más significativos. Por último, la sección 4 muestra las conclusiones del trabajo desarrollado.

2. PROCEDIMIENTO

La [Fig. 1](#) muestra el modelo realizado en el software CAD *SolidWorks*®, utilizado como montaje para la sujeción de espejos.

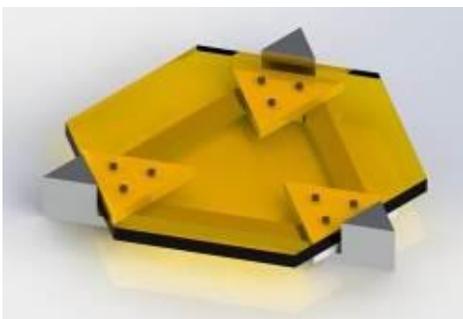


Fig. 1. Modelación de espejo y montura

A partir de la montura se modificó la distancia entre el centro del espejo hasta donde se ubican los apoyos triangulares. Se seleccionaron tres montajes: montaje 1, radio: 613,4 mm.; montaje 2, radio: 556,5 mm.; montaje 3, radio: 500,0 mm. Se consideraron situaciones mecánicas a las cuales podrían estar sujetos los espejos. Se tomó el efecto que tendría la inclinación del espejo, ya

que esto modifica la forma en que la gravedad actúa. Bajo esta línea, se tomó un primer caso en donde la gravedad actúa perpendicular al espejo, y un segundo caso donde la acción de la gravedad sería aplicada a 10° de la superficie del espejo, esto es una inclinación de 80° .

También se consideraron los efectos de los esfuerzos debido al cambio de temperatura. Esto es importante ya que los espejos utilizados en telescopios pueden presentar cambios drásticos en la temperatura de funcionamiento a lo largo del tiempo de trabajo ([Vukobratovich, 2005a](#) y [2005b](#)). Para las cargas térmicas, se tendrá una temperatura de referencia de 22°C y una temperatura de operación de 10°C . De esta manera, con ambas consideraciones, se establecieron cuatro pruebas diferentes a las cuales se sometieron los tres montajes descritos anteriormente:

En la primera prueba la aplicación de la gravedad es de forma perpendicular y sin aplicar cargas térmicas. En la segunda prueba la aplicación de la gravedad es a 10° con respecto a la superficie del espejo, sin aplicar cargas térmicas. En la tercera prueba la aplicación de la gravedad es de forma perpendicular, aplicando cargas térmicas. En cuarta prueba la aplicación de la gravedad es a 10° , aplicando cargas térmicas.

Una vez definidas las pruebas se realizaron las simulaciones utilizando el método de elementos finitos, mediante el software CAE *ANSYS*®. Los materiales seleccionados para los sistemas fueron aluminio 6061 para la sujeción mecánica y Zerodur para el espejo. Los perfiles de deformación obtenidos en las superficies de interés fueron exportadas al software de procesamiento numérico *MATLAB*®. Utilizando un ajuste por mínimos cuadrados, se reconstruyó el perfil deformado de cada espejo como una combinación lineal de los polinomios de Zernike. Sin embargo, debido a la geometría hexagonal de los espejos, se pierde la propiedad de ortogonalidad en los polinomios, por lo que debió aplicarse un método de ortogonalización, para obtener una nueva base de polinomios de Zernike ortogonales en la nueva geometría ([Dai, 2007](#)) ([Mahajan, 2007](#)).

Una vez reconstruidos los perfiles de deformación con los polinomios de Zernike, se realizó un análisis de los coeficientes más significativos de los polinomios utilizados en la reconstrucción.

Estos coeficientes fueron utilizados para realizar el análisis y determinar cuál de los montajes utilizados presenta la menor cantidad de aberraciones ópticas de orden superior (no corregibles). Además del análisis de los coeficientes, se calculó el valor cuadrático medio (RMS) de cada uno de los espejos, que se tuvo como criterio adicional para el análisis de la deformación de los dispositivos ópticos.

3. RESULTADOS

La Fig. 2 presenta los resultados obtenidos en la simulación por medio de elementos finitos, y la reconstrucción por medio de los polinomios de Zernike hexagonales, para cada uno de los tres montajes en la primera prueba. Cada columna está asociada a cada uno de los montajes. La primera fila corresponde a los perfiles de deformación obtenidos directamente de la simulación en elementos finitos y la segunda fila presenta la reconstrucción obtenida.

La Tabla 1 presenta los coeficientes más significativos utilizados en las reconstrucciones de la Fig. 2.

Tabla 1: Coeficientes más significativos de los polinomios (reconstrucción de la primera prueba)

Índice de polinomio	Coeficientes (μm)		
	Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3
5	0,6707	1,0350	1,1650
10	-1,9489	-1,8113	-1,7935
20	0,3990	0,3364	0,3130

También se debe tener en cuenta el RMS de la deformación (ver Tabla 2). En la tabla se presenta además el error cuadrático medio (RMSE), el cual presenta una medida del error entre la deformación real y la reconstrucción realizada.

Tabla 2: RMS y RMSE para la primera prueba

Montaje	RMS (μm)	RMSE (μm)
1	1,3122	0,0374
2	1,3160	0,0309
3	1,3457	0,0294

De manera similar, la Fig. 3 presenta los perfiles de deformación y las reconstrucciones obtenidas para la segunda prueba.

En la Tabla 3 se muestran los coeficientes significativos obtenidos de las reconstrucciones de la segunda prueba. Puede verse como la inclinación del espejo genera el aumento relativo del coeficiente del polinomio 6 en comparación con la prueba anterior.

Tabla 3: Coeficientes más significativos de los polinomios (reconstrucción de la segunda prueba)

Índice de polinomio	Coeficientes (μm)		
	Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3
5	0,1168	0,1797	0,1999
6	-0,0821	-0,0744	-0,0793
10	-0,3382	-0,3141	-0,3058
20	0,0692	0,0583	0,0524

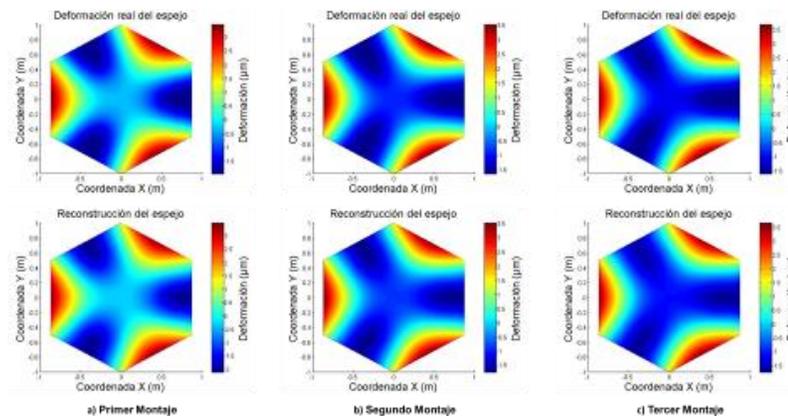


Fig. 2. Perfil de deformaciones y reconstrucción para la prueba con gravedad perpendicular y sin aplicar cargas térmicas.

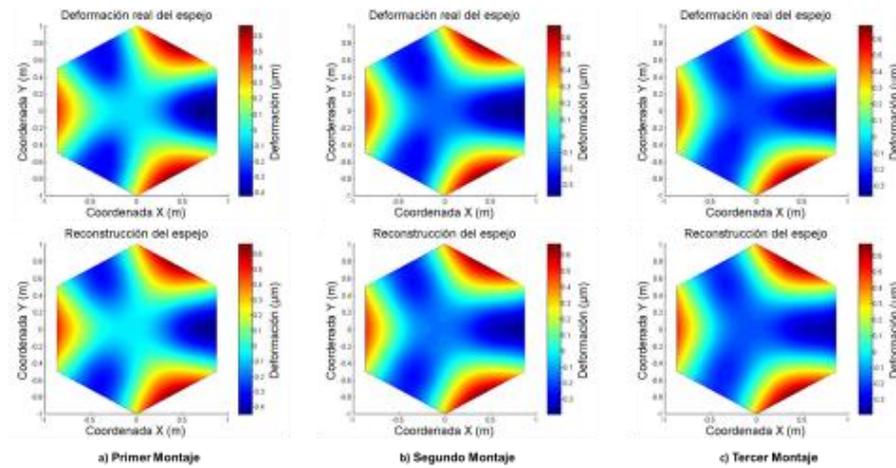


Fig. 3. Perfil de deformaciones y reconstrucción, para la prueba con gravedad a 10° y sin aplicar cargas térmicas

Al comparar los resultados de la [Fig. 2](#) y la [Fig. 3](#), se observa que en esta última se presenta una concentración de los esfuerzos en el lateral derecho del espejo, debido a la influencia del ángulo del vector de la gravedad, mientras que en el primer caso los esfuerzos se presentan de forma simétrica.

La [Tabla 4](#) muestra los valores para el RMS y el RMSE obtenidos para la segunda prueba. Los

resultados presentados hasta ahora contienen información de deformaciones debidas únicamente a cargas mecánicas, sin efecto alguno de cambios en la temperatura.

La [Fig. 4](#) presenta los perfiles de deformación y las reconstrucciones realizadas, para la prueba con cargas térmicas y aplicando la gravedad de forma perpendicular.

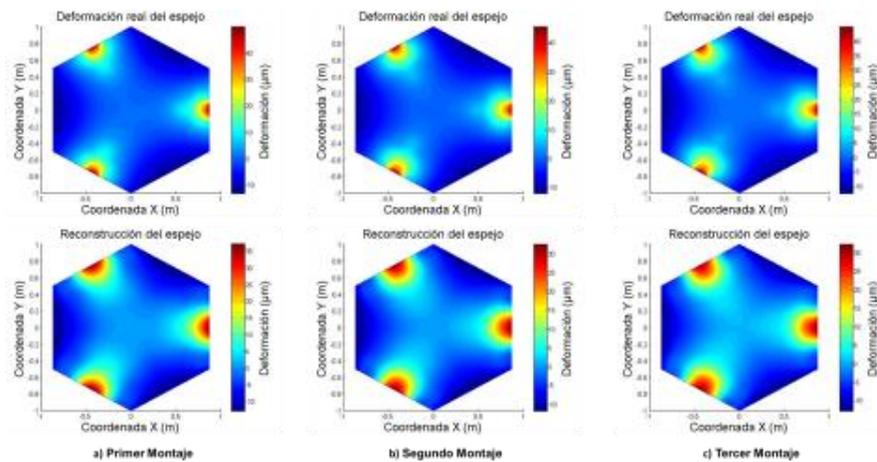


Fig. 4. Perfil de deformaciones y reconstrucción para la prueba con gravedad perpendicular y aplicando esfuerzos térmicos.

Tabla 4: RMS y RMSE para la segunda prueba

Montaje	RMS (μm)	RMSE (μm)
1	0,2340	0,0073
2	0,2336	0,0062
3	0,2357	0,0059

En la [Tabla 5](#) puede verse una diferencia significativa con los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas. Además, los perfiles de deformación presentan una zona de concentración de los esfuerzos más pequeña, gracias al alto

coeficiente de expansión térmica de la sujeción de aluminio.

Tabla 5: Coeficientes más significativos de los polinomios (reconstrucción de la tercera prueba)

Índice de polinomio	Coeficientes (μm)		
	Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3
10	11,3829	10,6412	10,6635
28	3,9628	3,5615	3,5392
55	2,1359	1,9169	1,9809
91	1,4087	1,3920	1,4418

Así mismo, se presentan los valores para el RMS del espejo deformado y el RMSE para la reconstrucción en la [Tabla 6](#).

Tabla 6: RMS y RMSE para la tercera prueba

Montaje	RMS (μm)	RMSE (μm)
1	7,9951	1,1667
2	7,5799	1,1256
3	7,7016	1,1559

Los resultados de la última prueba se presentan en la [Fig. 5](#), para el perfil de deformación y la

reconstrucción, y en la [Tabla 7](#), donde se presentan los coeficientes más significativos de la reconstrucción.

Tabla 7: Coeficientes más significativos de los polinomios (reconstrucción de la prueba anterior)

Índice de polinomio	Coeficientes (μm)		
	Montaje 1	Montaje 2	Montaje 3
10	12,9936	12,1383	12,1276
28	3,9721	3,5765	3,5586
55	2,1164	1,9013	1,9676
91	1,3888	1,3756	1,4263

Por último, la [Tabla 8](#) contiene los valores para el RMS y RMSE obtenidos en la cuarta prueba para cada uno de los montajes.

Tabla 8: RMS y RMSE para la cuarta prueba

Montaje	RMS (μm)	RMSE (μm)
1	8,9424	1,1587
2	8,4759	1,1177
3	8,5897	1,1473

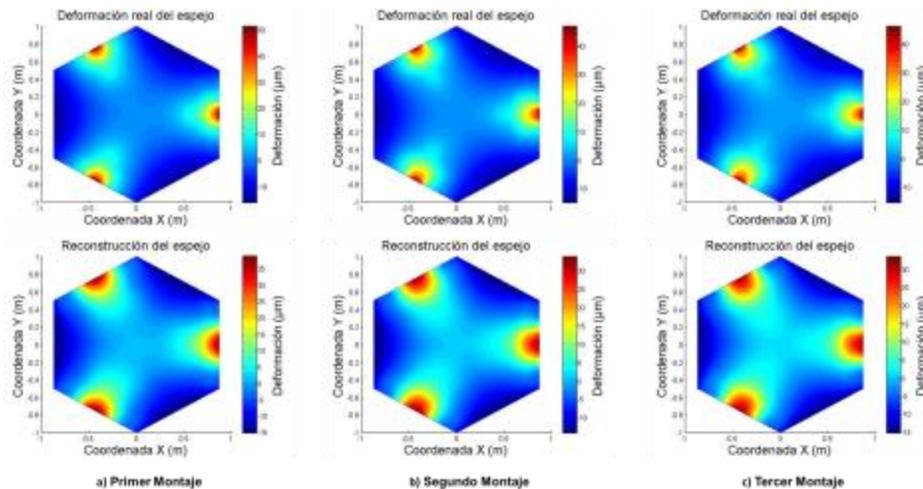


Fig. 5. Perfil de deformaciones y reconstrucción, para la prueba con gravedad a 10° y aplicando esfuerzos térmicos

4. CONCLUSIONES

Según los resultados presentados en las tablas, se concluye que el montaje mecánico que produce las mayores aberraciones ópticas de orden superior para las pruebas realizadas es el primer montaje. A pesar de que en las primeras dos

pruebas este montaje presentó los menores coeficientes para los polinomios de índice 5, en el resto de polinomios para todas las pruebas siempre se registraron los mayores coeficientes para este montaje.

Por otro lado, los montajes 2 y 3 presentaron resultados similares en las pruebas sin esfuerzos

térmicos. En estas pruebas, el montaje 3 obtuvo mejores resultados ya que presentó menores coeficientes para los polinomios de mayor índice. Sin embargo, en estas pruebas, el segundo montaje registró el menor RMS, por lo que presenta una deformación total menor que aquella obtenida en el tercer montaje.

Al analizar posteriormente los resultados de las pruebas que tuvieron en consideración los esfuerzos térmicos, se observa que el segundo montaje obtuvo los menores coeficientes para todos los polinomios en ambas pruebas. Esta información, en conjunto con aquella analizada en las pruebas sin aplicación de esfuerzos térmicos, permite concluir que el segundo montaje presenta la menor cantidad de aberraciones ópticas no corregibles, por lo que es el mejor de los tres montajes presentados.

REFERENCIAS

- Bonet, J. A. (1999). High spatial resolution imaging in solar physics. *Motions in the solar atmosphere. Astrophysics and space science library.*, **239**, 1-34.
- Dai, G.-m., & Mahajan, V. (2007). Nonrecursive determination of orthonormal polynomials with matrix formulation. *Optics Letters*, **32** (1), 74-76.
- Doyle, K., Genberg, V., & Michels, G. (2002). *Integrated Optomechanical Analysis*. Bellingham: SPIE PRESS.
- Mahajan, V., & Dai, G.-m. (2007). Orthonormal polynomials in wavefront analysis: analytical solution. *J. Opt. Soc. Am. A*, **24** (9), 2994-3016.
- Sanchez-Blanco, E., & Bello, D. (2007). *Technical Note: GTCAO. System. Wavefront sensor. ADR*. La Laguna, Tenerife.
- Vukobratovich, D., & Vukobratovich, S. (2005). *Advanced Topics in Opto-mechanics*. Tucson, Arizona: Raytheon Systems Co., Defense Systems Segment.
- Vukobratovich, D., & Vukobratovich, S. (2005). *Introduction to Opto-mechanical Design*. Tucson, Arizona: Raytheon System Co., Defense System Segment.

SOBRE LOS AUTORES

Martín Rodríguez-Vega

Estudiante de Ingeniería Física de la Universidad EAFIT. Área de interés investigativo: Métodos numéricos.

Anderson Bermúdez

Estudiante de Ingeniería Física de la Universidad EAFIT. Área de interés investigativo: Mecánica de precisión.

María Isabel Rúa

Estudiante de Ingeniería Física de la Universidad EAFIT. Área de interés investigativo: Mecánica de precisión.

Luisa Fernanda Benavides

Estudiante de Ingeniería Física de la Universidad EAFIT.

René Restrepo

Profesor e ingeniero mecánico de la Universidad EAFIT, con maestría en física e informática de la Universidad de La Laguna, Tenerife, España. Candidato a Doctor del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y la Universidad Complutense de Madrid. Área de interés investigativo: Óptica aplicada en sistema de precisión.